

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

*ESTUDIO DEL IMPACTO DE UN VEHÍCULO SOBRE
BARRERAS DE SEGURIDAD MEDIANTE LS-DYNA*

PROYECTO FIN DE CARRERA

Ingeniería Técnica Industrial: Mecánica

Autor:

D. Rubén Escudero Melendo

Tutora:

Dra. D^a. Beatriz López Boada

JUNIO 2010



ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUCCIÓN | 8 |
| 1.1. OBJETIVO..... | 10 |
| 1.2. ESTRUCTURA DEL PROYECTO | 11 |
| 2. SEGURIDAD VEHICULAR..... | 13 |
| 2.1. SEGURIDAD ACTIVA | 14 |
| 2.1.1. SISTEMA DE FRENOS..... | 14 |
| 2.1.2. DIRECCIÓN | 16 |
| 2.1.3. SISTEMA DE CONTROL DE ESTABILIDAD..... | 17 |
| 2.1.4. SISTEMA DE CONTROL DE TRACCIÓN | 19 |
| 2.1.5. BLOQUEO ELECTRÓNICO DEL DIFERENCIAL | 19 |
| 2.1.6. SUSPENSIÓN | 20 |
| 2.1.7. SISTEMAS DE ILUMINACIÓN ADAPTATIVA..... | 21 |
| 2.1.8. OTROS SISTEMAS..... | 22 |
| 2.2. SEGURIDAD PASIVA..... | 24 |
| 2.2.1. CINTURÓN DE SEGURIDAD | 24 |
| 2.2.2. AIRBAG | 27 |
| 2.2.3. REPOSACABEZAS | 28 |
| 2.2.4. BASTIDOR Y CARROCERIA | 29 |
| 3. EURONCAP..... | 31 |
| 3.1. HISTORIA DESDE 1970 | 31 |
| 3.2. PRUEBAS EURONCAP | 33 |
| 3.2.1. IMPACTO FRONTAL..... | 33 |
| 3.2.2. IMPACTO LATERAL | 34 |
| 3.2.3. IMPACTO LATERAL CONTRA POSTE..... | 35 |



| | | |
|--------|--|----|
| 3.2.4. | PROTECCIÓN INFANTIL | 36 |
| 3.2.5. | PROTECCIÓN DE PEATONES | 37 |
| 3.2.6. | LATIGAZO CERVICAL (WHIPLASH)..... | 37 |
| 3.2.7. | ELECTRONIC STABILITY CONTROL (ESC) | 38 |
| 3.2.8. | SEAT BELT REMINDER (SBR)..... | 38 |
| 3.2.9. | SISTEMAS DE LIMITACIÓN DE VELOCIDAD..... | 38 |
| 3.3. | VALORACIÓN DE EURONCAP | 39 |
| 4. | MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS..... | 40 |
| 4.1. | PRINCIPIO Y APLICACIONES | 41 |
| 4.2. | LS-DYNA..... | 43 |
| 5. | MODELOS SIMULADOS | 46 |
| 5.1. | VEHÍCULO TIPO TODO-TERRENO | 47 |
| 5.1.1. | GEOMETRÍA | 48 |
| 5.1.2. | MATERIALES | 49 |
| 5.1.3. | VELOCIDAD INICIAL | 51 |
| 5.1.4. | GRAVEDAD | 53 |
| 5.1.5. | ACELERÓMETROS | 53 |
| 5.2. | VEHÍCULO TIPO TURISMO | 55 |
| 5.2.1. | GEOMETRÍA | 56 |
| 5.2.2. | MATERIALES | 57 |
| 5.2.3. | VELOCIDAD INICIAL | 58 |
| 5.2.4. | GRAVEDAD | 60 |
| 5.2.5. | ACELERÓMETROS | 61 |
| 5.3. | BARRERAS DE SEGURIDAD..... | 62 |
| 5.3.1. | BARRERA METÁLICA | 63 |



| | | |
|----------|---|-----|
| 5.3.1.1. | GEOMETRÍA | 64 |
| 5.3.1.2. | MATERIALES | 65 |
| 5.3.2. | BARRERA DE HORMIGÓN | 65 |
| 5.3.2.1. | GEOMETRÍA | 66 |
| 5.3.2.2. | MATERIALES | 67 |
| 5.4. | CONTACTOS ENTRE LOS DISTINTOS ELEMENTOS..... | 68 |
| 5.4.1. | CONTACTO VEHÍCULO-BARRERA..... | 68 |
| 5.4.2. | CONTACTO VEHÍCULO-SUELO | 69 |
| 6. | NORMA UNE EN 1317 | 70 |
| 7. | RESULTADOS | 74 |
| 7.1. | CHOQUE FRONTAL CONTRA BARRERA METÁLICA..... | 75 |
| 7.1.1. | VEHÍCULO TIPO TODO-TERRENO | 75 |
| 7.1.2. | VEHÍCULO TIPO TURISMO | 79 |
| 7.2. | CHOQUE LATERAL CONTRA BARRERA METÁLICA | 82 |
| 7.2.1. | VEHÍCULO TIPO TODO-TERRENO | 82 |
| 7.2.2. | VEHÍCULO TIPO TURISMO | 85 |
| 7.3. | CHOQUE FRONTAL CONTRA BARRERA DE HORMIGÓN | 88 |
| 7.3.1. | VEHÍCULO TIPO TODO-TERRENO | 89 |
| 7.3.2. | VEHÍCULO TIPO TURISMO | 92 |
| 7.4. | CHOQUE LATERAL CONTRA BARRERA DE HORMIGÓN | 95 |
| 7.4.1. | VEHÍCULO TIPO TODO-TERRENO | 95 |
| 7.4.2. | VEHÍCULO TIPO TURISMO | 98 |
| 7.5. | COMPARACIÓN DE RESULTADOS..... | 101 |
| 8. | CONCLUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS | 103 |
| 9. | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 105 |



ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2-1 Esquema frenos con ABS | 15 |
| Figura 2-2 City Safety de Volvo | 16 |
| Figura 2-3 Subviraje | 18 |
| Figura 2-4 Sobreviraje | 18 |
| Figura 2-5 Suspensión delantera | 20 |
| Figura 2-6 Alumbrado lateral | 22 |
| Figura 2-7 Alumbrado en curva | 22 |
| Figura 2-8 Pretensor pirotécnico..... | 26 |
| Figura 2-9 Llenado del Airbag..... | 28 |
| Figura 2-10 Latigazo cervical..... | 29 |
| Figura 2-11 Carrocería autoportante | 30 |
| Figura 3-1 Esquema de choque frontal | 33 |
| Figura 3-2 Ensayo EuroNCAP choque frontal | 34 |
| Figura 3-3 Esquema de choque lateral | 34 |
| Figura 3-4 Ensayo EuroNCAP choque lateral..... | 35 |
| Figura 3-5 Esquema de choque contra poste..... | 35 |
| Figura 3-6 Ensayo EuroNCAP choque contra poste | 36 |
| Figura 3-7 Impacto del cuerpo sobre el coche | 37 |
| Figura 3-8: Resultados impacto frontal (conductor y acompañante)..... | 39 |
| Figura 4-1 Comparativa modelo simulación y modelo real | 42 |
| Figura 4-2 Simulación de prueba de impacto..... | 44 |
| Figura 5-1 Chevrolet C1500 LS-DYNA | 47 |
| Figura 5-2 Estructura Chevrolet C1500 LS-DYNA | 48 |
| Figura 5-3 Acelerómetros Chevrolet C1500..... | 55 |
| Figura 5-4 Dodge Neon LS-DYNA | 55 |
| Figura 5-5 Estructura Dodge Neon LS-DYNA | 56 |
| Figura 5-6 Acelerómetros Dodge Neon..... | 62 |
| Figura 5-7 Barrera metálica..... | 63 |
| Figura 5-8 Barrera de hormigón | 63 |



| | |
|--|----|
| Figura 5-9 Barrera metálica LS-DYNA..... | 64 |
| Figura 5-10 Barrera de hormigón LS-DYNA | 66 |
| Figura 5-11 Perfil barrera de hormigón acotado en mm | 67 |
| Figura 7-1 Secuencia impacto frontal Chevrolet contra barrera metálica..... | 75 |
| Figura 7-2 Gráfica de la velocidad en dirección X Chevrolet..... | 76 |
| Figura 7-3 Gráfica de la aceleración en dirección X Chevrolet | 77 |
| Figura 7-4 Gráfica de la velocidad en dirección Y Chevrolet..... | 78 |
| Figura 7-5 Gráfica de la velocidad en dirección Z Chevrolet..... | 78 |
| Figura 7-6 Secuencia impacto frontal Neon contra barrera metálica | 79 |
| Figura 7-7 Gráfica de la velocidad en dirección X Neon | 80 |
| Figura 7-8 Gráfica de la aceleración en dirección X Neon | 81 |
| Figura 7-9 Secuencia impacto lateral Chevrolet contra barrera metálica | 83 |
| Figura 7-10 Gráfica de la velocidad en dirección Y Chevrolet | 84 |
| Figura 7-11 Gráfica de la aceleración en dirección Y Chevrolet | 84 |
| Figura 7-12 Secuencia impacto lateral Neon contra barrera metálica | 86 |
| Figura 7-13 Gráfica de la velocidad en dirección Y Neon | 87 |
| Figura 7-14 Gráfica de la aceleración en dirección Y Neon..... | 87 |
| Figura 7-15 Secuencia impacto frontal Chevrolet contra barrera de hormigón | 89 |
| Figura 7-16 Gráfica de la velocidad en dirección X Chevrolet | 90 |
| Figura 7-17 Gráfica de la aceleración en dirección X Chevrolet | 91 |
| Figura 7-18 Secuencia impacto frontal Neon contra barrera de hormigón..... | 92 |
| Figura 7-19 Gráfica de la velocidad en dirección X Neon | 93 |
| Figura 7-20 Gráfica de la aceleración en dirección X Neon..... | 94 |
| Figura 7-21 Secuencia impacto lateral Chevrolet contra barrera hormigón..... | 95 |
| Figura 7-22 Gráfica de la velocidad en dirección Y Chevrolet | 96 |
| Figura 7-23 Gráfica de la aceleración en dirección Y Chevrolet | 97 |
| Figura 7-24 Secuencia impacto lateral Neon contra barrera hormigón..... | 98 |
| Figura 7-25 Gráfica de la velocidad en dirección Y Neon | 99 |
| Figura 7-26 Gráfica de la aceleración en dirección Y Neon..... | 99 |



ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 5-1 Unidades de medida | 47 |
| Tabla 5-2 Datos del vehículo tipo todo-terreno | 49 |
| Tabla 5-3 Piecewise Linear Plasticity Chevrolet | 50 |
| Tabla 5-4 Rigid Chevrolet | 50 |
| Tabla 5-5 Centros de rotación neumáticos Chevrolet | 52 |
| Tabla 5-6 Datos del vehículo tipo turismo | 56 |
| Tabla 5-7 Piecewise Linear Plasticity Dodge | 57 |
| Tabla 5-8 Rigid Dodge | 58 |
| Tabla 5-9 Centros de rotación neumáticos Dodge | 60 |
| Tabla 5-10 Parámetros de los materiales de W-Beam Guardrail | 65 |
| Tabla 5-11 Parámetro del material de Portable Concrete Barrier | 67 |
| Tabla 6-1 Índice ASI | 72 |
| Tabla 7-1 Resultados ASI Impactos Frontales | 101 |
| Tabla 7-2 Resultados ASI Impactos Laterales | 101 |



1. INTRODUCCIÓN

La simulación de accidentes es una herramienta informática muy útil para mejorar la seguridad del vehículo, conocer el comportamiento de sus componentes en caso de un accidente y minimizar costes en pruebas de colisión reales [1].

Las pruebas de colisión del consorcio europeo EuroNCAP se limitan al choque frontal y lateral contra un elemento deformable, lateral contra poste y el atropello a un peatón. Sin embargo, la industria del automóvil necesita probar sus vehículos en todos los tipos posibles de colisiones y accidentes: vuelcos, colisiones contra vallas protectoras, señales de tráfico, impactos fronto-laterales, por alcance, etc.

Utilizar vehículos y escenarios reales en tantas pruebas es económicamente inviable. Sin embargo, la simulación por ordenador permite recrear con gran exactitud todas estas situaciones. Así, los ingenieros pueden realizar innumerables pruebas para mejorar la calidad y seguridad de los vehículos.



Además, el incremento exponencial de la potencia de los ordenadores también ha facilitado el trabajo. Actualmente, la informática permite realizar gran cantidad de ensayos en muy poco tiempo. De esta manera se mejora la seguridad de los vehículos, se reduce el tiempo de desarrollo y se abarata costes, tanto en horas de trabajo de ingenieros cualificados como en pruebas reales de impacto de vehículos, generalmente prototipos, cuyos componentes son muy costosos.

Mediante las simulaciones, los ingenieros e investigadores pueden ver y configurar los parámetros de la colisión de forma inmediata. Además con estas simulaciones por ordenador se puede conocer las consecuencias que el impacto tiene para los ocupantes del vehículo.

En este proyecto se realizan ocho simulaciones de choque, por un lado impacta un vehículo tipo todo-terreno contra una barrera metálica (frontal y lateralmente) y contra una barrera de hormigón (frontal y lateralmente), y por otro lado, impacta un vehículo tipo turismo de forma análoga al vehículo anterior.

Para hacer este proyecto, se emplea el método de elementos finitos. Para ello, se utiliza un software avanzado que emplea esta metodología: LS-DYNA, para el procesado de la simulación, y LS-PREPOST, mediante este programa se introducen las condiciones de contorno adecuadas para cada caso simulado, y posteriormente se evalúan los resultados obtenidos. Estos programas están desarrollados por Livemore Technology Software Corporation (LSTC) y son empleados en la industria del automóvil para evaluar la seguridad que ofrecen los vehículos en diferentes situaciones de impacto [2].



1.1. OBJETIVO

El objetivo de este proyecto es evaluar los daños que puede sufrir un ocupante en distintas situaciones de impacto. Para ello se va a establecer una comparativa entre dos tipos de vehículos; uno es tipo turismo, y el otro es tipo todo-terreno. Los impactos se realizan mediante un modelo tridimensional elaborado con LS-PREPOST, una aplicación de LS-DYNA. Se realizan un total de ocho simulaciones, en las que, los dos tipos de vehículos enunciados anteriormente chocarán frontal y lateralmente contra dos tipos de barreras de seguridad (metálica y hormigón). Para obtener una comparativa objetiva, se analizan los resultados aplicando la normativa UNE EN 1317, en concreto, el índice ASI (Acceleration Severity Index), que su vez da una idea de la severidad de los diferentes impactos.

Hay que indicar que los modelos empleados en las simulaciones, tanto las barreras de seguridad como los vehículos, han sido elaborados por NCAC (National Crash Analysis Center) y se encuentran disponible para todo el público a través de su web.

Finalmente, mencionar que, no es objetivo de este proyecto el análisis del diseño estructural de las barreras y de los vehículos, sino establecer las condiciones de contorno necesarias, fijando la velocidad y estableciendo los diferentes contactos entre superficies, para obtener los resultados de los impactos, y que éstos reflejen, con la mayor fidelidad posible, una situación real. Así, se puede realizar la comparativa entre los vehículos empleados de una forma más rigurosa.



1.2. ESTRUCTURA DEL PROYECTO

El proyecto está formado por diversos capítulos, cuyo contenido se explica brevemente a continuación:

En este primer capítulo, se hace una introducción al tema del proyecto. Además se detallan los objetivos que se pretenden alcanzar en el mismo.

El capítulo segundo, SEGURIDAD VEHICULAR, después de una breve introducción, se desglosa en dos apartados: SEGURIDAD ACTIVA y SEGURIDAD PASIVA. En cada una de ellas se incluyen, comentados brevemente, los distintos componentes y sistemas que forman parte de cada apartado.

Posteriormente, en el capítulo tercero, EURONCAP, se hace una breve reseña histórica al organismo europeo de evaluación de vehículos. A continuación, se comentan las distintas pruebas que aplican sobre los automóviles, para concluir con la valoración final que realiza este organismo sobre los vehículos.

En el capítulo cuarto, METODO DE ELEMENTOS FINITOS, se explica el método de elementos finitos, ya que es la metodología en la que se basa el programa de LS-DYNA empleado en este proyecto: LS-PREPOST.

A continuación en el capítulo quinto, MODELOS EMPLEADOS EN LA SIMULACIÓN, tras una introducción, se comenta detalladamente, todos componentes que forman parte de este proyecto: vehículo tipo todo-terreno, vehículo tipo turismo y los dos tipos de barrera empleados: metálica y hormigón. Además, se indica la geometría y materiales de los componentes anteriormente enunciados, los acelerómetros y su ubicación y las condiciones de contorno que se han definido para la simulación.



En el sexto capítulo se incluye la normativa aplicada en este proyecto, NORMA EUROPEA EN 1317, ya que es importante para interpretar los resultados obtenidos. Con esta normativa se determinará el nivel de protección de los sistemas de contención ante impactos de diferentes tipos de vehículos.

En el capítulo séptimo, RESULTADOS, se plantean los ocho casos estudiados, se muestran todos los resultados obtenidos y se hace una valoración de los mismos en cada una de las simulaciones.

En el capítulo octavo, CONCLUSIONES y TRABAJOS FUTUROS, se extraen conclusiones mediante una comparativa entre los vehículos empleados a partir de los resultados obtenidos. Además se proponen trabajos futuros que complementen al estudio realizado.

2. SEGURIDAD VEHICULAR

Los automóviles han evolucionado con el paso del tiempo, cada vez ofrecen más prestaciones (velocidad, aceleración, mayor velocidad en paso por curva, etc.), y con ellos también se han realizado grandes avances en la seguridad de los vehículos. La velocidad media de circulación ha incrementado, lo que ha provocado la mejora de los sistemas de seguridad del automóvil, tratando de minimizar, lo máximo posible, la gravedad de las lesiones que puedan sufrir los ocupantes en caso de choque o vuelco [3].

En general, la seguridad vial trata de evitar los accidentes. La seguridad depende de tres aspectos:

- La persona: su condición física, su percepción y estado de ánimo, las sensaciones y reacciones que recibe el conductor del coche y de la adaptación a las condiciones de circulación.
- El automóvil: los sistemas de iluminación, los frenos, la acústica, la climatización, la suspensión, en definitiva el estado mecánico del vehículo.



- El entorno: la climatología, la densidad de tráfico, el estado de las carreteras, la adherencia disponible, la señalización de las carreteras, los sistemas de información, etc.

En definitiva, la seguridad de un vehículo va a permitir, en caso de accidente, causar los mínimos daños posibles, tanto materiales como personales. Además facilitará el posterior rescate y la prestación de asistencia a los ocupantes y peatones involucrados en una posible colisión.

Todas las medidas que en este sentido desarrollan los fabricantes en el diseño de los automóviles se le da el nombre de seguridad activa y pasiva.

2.1. SEGURIDAD ACTIVA

La seguridad activa es todo elemento cuyo objetivo es evitar que se produzca un accidente, actuando antes de que éste ocurra. A diferencia de la seguridad pasiva, en la seguridad activa es necesaria la intervención del conductor: sistema de frenos, alumbrado, etc. [3].

2.1.1. SISTEMA DE FRENOS

El sistema de frenos, cuyo esquema en un vehículo se puede ver en la Figura 2-1, es necesario para adaptar la velocidad del vehículo a las condiciones de la calzada, por lo tanto su función consiste en reducir la velocidad sin producir cambios de trayectoria [4].

Actualmente, existen sistemas de ayuda a la frenada, que facilitan al conductor mantener el control sobre el vehículo. Estos sistemas son:

- Sistema antibloqueo de frenos (ABS), cuyo esquema se puede ver en la Figura 2-1, es un dispositivo que evita el bloqueo de las ruedas al frenar. Un sensor de revoluciones, instalado en cada rueda, detecta en cada instante de la frenada si una rueda está a punto de bloquearse. En ese caso, reduce la presión de frenado sobre esa rueda y evita el bloqueo, de esta manera permite mantener el control sobre la dirección (con las ruedas delanteras bloqueadas, los vehículos “pierden” la dirección).

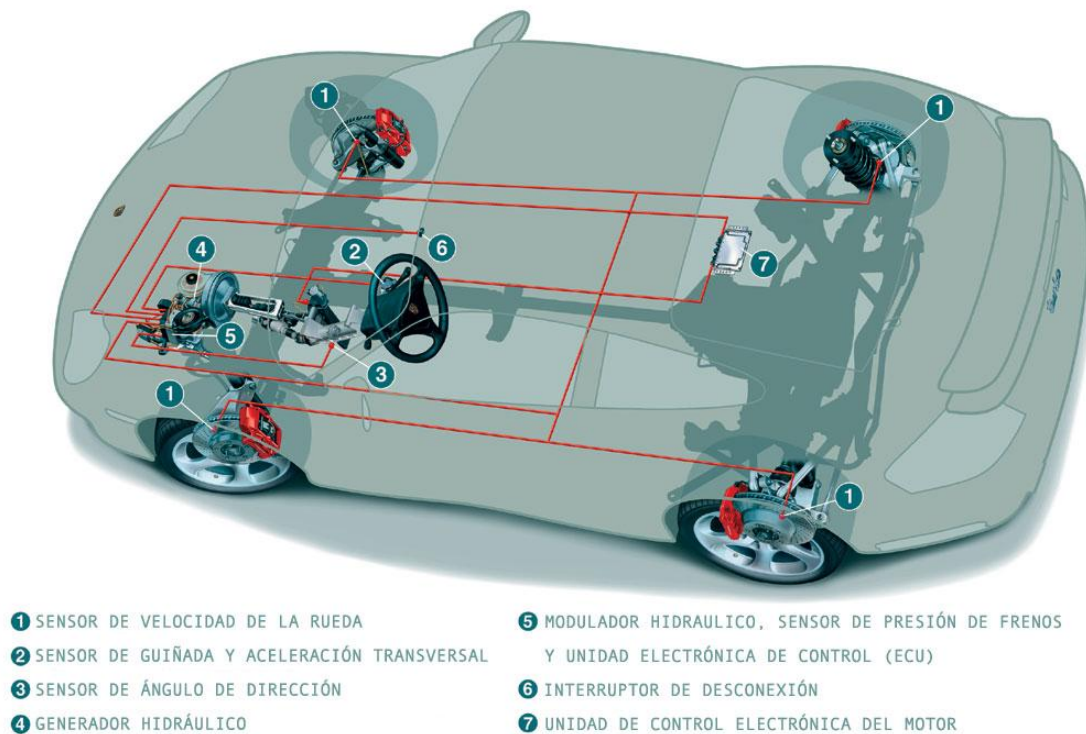


Figura 2-1 Esquema frenos con ABS

- Distribución electrónica de la fuerza de frenado (EBD), mediante la ayuda del ABS, regula la potencia de frenado en las ruedas traseras, impidiendo que el vehículo haga un trompo por el bloqueo de éstas.

- Sistema electrónico de asistencia a la frenada (EBS), se activa cuando detecta que el conductor frena de forma rápida y brusca aplicando la potencia de frenado máxima. Así, pisando el pedal a presión moderada, se produce una desaceleración máxima.

Recientemente, la marca sueca de automóviles Volvo incorpora en alguno de sus modelos el sistema denominado City Safety. Este sistema está dirigido a mitigar colisiones traseras cuando el vehículo circula a velocidades inferiores a 30 km/h. Cuando el sistema detecta una colisión inminente, los frenos se precargan, ya que en el caso de que el conductor no frene, el dispositivo acciona automáticamente los frenos para evitar la colisión, como se puede ver en la Figura 2-2 [5].



Figura 2-2 City Safety de Volvo

2.1.2. DIRECCIÓN

La dirección de un vehículo es el conjunto de mecanismos que permiten orientar las ruedas directrices, generalmente las del eje delantero, para que el vehículo tome la trayectoria deseada por el conductor [6].

Con el objetivo de aumentar la seguridad en caso de impacto, para evitar la invasión en el habitáculo, la columna de dirección tiene una parte deformable o retráctil que absorbe la energía del impacto evitando así la intrusión en el interior del vehículo.

Debido al aumento de superficie de contacto entre los neumáticos y el asfalto, la dirección de un vehículo ha evolucionado dando lugar a distintos sistemas de dirección asistida: hidráulica, electrohidráulica y electromecánica. Estas dos últimas adaptan su funcionamiento al nivel de dirección asistida requerido, es decir, la dirección asistida alcanza su nivel máximo a bajas velocidades (maniobras), y a velocidades más elevadas, mediante un sistema electrónico, la dirección reduce gradualmente el grado de asistencia [7].

2.1.3. SISTEMA DE CONTROL DE ESTABILIDAD

El sistema de control de estabilidad es comúnmente conocido como ESP (Electronic Stability Program), aunque hay otros nombres en función de la marca que lo comercialice. En los test de EuroNCAP recibe el nombre de ESC (Electronic Stability Control) [6].

Este sistema, que es un complemento del ABS, evita el deslizamiento del vehículo en sentido transversal, lo que permite conservar la trayectoria del vehículo en curva, previniendo el inicio de derrapaje y tratando de subsanar los errores de pérdida de trayectoria, que pueden ser difíciles de controlar para la mayoría de los conductores. El sistema de control de estabilidad actúa cuando la trayectoria del automóvil no se corresponde con el ángulo de giro del volante. Cuando el automóvil realiza un viraje, debido a la fuerza centrífuga, puede suceder que en una o varias ruedas disminuya la adherencia lateral, pudiendo incluso provocar el derrape del vehículo, en ese instante entra en funcionamiento el sistema de control de estabilidad [8].

Cuando se produce un subviraje, el coche tiende a seguir recto en una curva como se ve en la Figura 2-3. El sistema de control de estabilidad compara el ángulo de giro del volante con el ángulo de giro real del vehículo, si no concuerdan, el ESC actúa sobre el freno de la rueda trasera interior, corrigiendo la desviación de la trayectoria del automóvil. De esta forma se logra que el coche gire de la parte delantera hacia el interior de la curva [6].

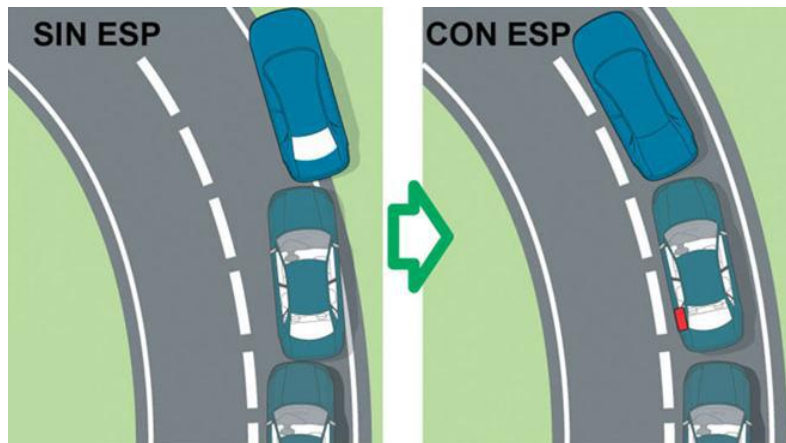


Figura 2-3 Subviraje

Cuando se produce un sobreviraje, el vehículo tiende a girar más de lo indicado por el volante, cerrando la trayectoria, llegando incluso a realizar un trompo, como se ve en la Figura 2-4. En este caso, el sistema de control de estabilidad actúa frenando la rueda delantera exterior, corrigiendo la desviación del vehículo.

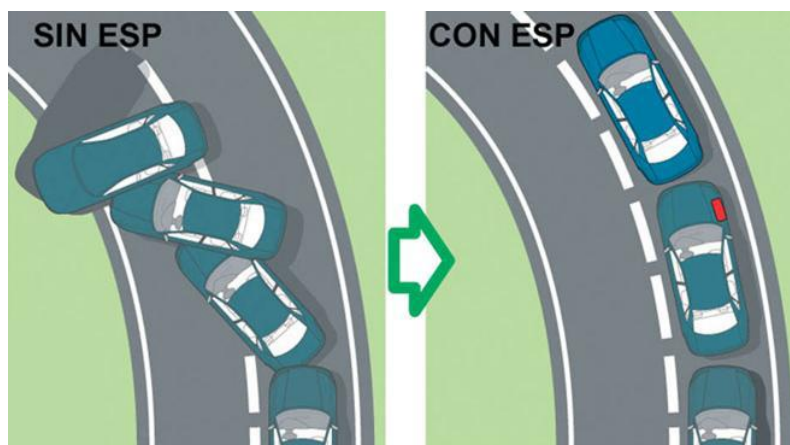


Figura 2-4 Sobreviraje



Todos los estudios disponibles de las diferentes marcas de automóviles llegan a la conclusión de que el ESC es eficaz y contribuye considerablemente a reducir las lesiones y fallecimientos en accidentes de tráfico en las carreteras europeas, ya que ha aumentado el porcentaje de vehículos que equipan este sistema de serie. Incluso, la Comisión Europea (CE) ha propuesto en el año 2008, que el sistema de control de estabilidad electrónico de los vehículos sea obligatorio a partir de 2012.

El sistema de control de estabilidad tiene sus limitaciones, ya que por sí solo no es capaz de evitar un accidente, necesita un conductor responsable y preparado que sepa obtener el máximo beneficio de este sistema.

2.1.4.SISTEMA DE CONTROL DE TRACCIÓN

El sistema de control de tracción ASR (o TCS según marcas) previene que las ruedas puedan patinar al arrancar o acelerar y complementa la función del ABS. El sistema de control de tracción reduce el par aportado por el motor y, si es necesario, frena individualmente cada rueda para regular el deslizamiento y que su fuerza de par efectiva alcance lo antes posible un nivel óptimo. El ASR mejora la tracción y aumenta la seguridad del vehículo, evitando situaciones inestables [7].

2.1.5.BLOQUEO ELECTRÓNICO DEL DIFERENCIAL

El bloqueo electrónico del diferencial (EDL) es un componente integral del ESC y del ASR, que permite arranques suaves y confortables sobre firmes que presentan niveles de adherencia desiguales. Si una rueda empieza a patinar, el bloqueo electrónico del diferencial frena esa rueda en la medida necesaria, dirigiendo la potencia a la rueda con mayor capacidad de tracción [7].

2.1.6. SUSPENSIÓN

La suspensión de un vehículo tiene la misión de absorber las desigualdades del terreno y mantener las ruedas en contacto con el pavimento, proporcionando confort y seguridad de marcha [6].

El conjunto de la suspensión, mostrado en la Figura 2-5, está compuesto por un elemento flexible (generalmente muelle de ballesta o helicoidal) y un elemento de amortiguación (amortiguador), cuya misión es neutralizar las oscilaciones de la masa suspendida originadas por el elemento flexible para adaptarse a las irregularidades del terreno. Los neumáticos se consideran también parte de la suspensión.



Figura 2-5 Suspensión delantera

La tecnología ha permitido mejorar la suspensión convencional, dando lugar a la suspensión activa. Este tipo de suspensión hidroneumática combina elementos hidráulicos y elementos neumáticos que proporcionan la amortiguación y elasticidad necesarias [9].

La suspensión activa está controlada por ordenador, lo que permite variar la flexibilidad de la misma, adaptándola a las condiciones de marcha del vehículo y tipo de conducción, controlando la inclinación de la carrocería a medida que surgen los obstáculos, cambia la velocidad, se actúa sobre el volante o se accionan los frenos. El sistema permite nivelar uno o ambos ejes cuando se carga el vehículo, reducir la altura de la carrocería cuando se circula a alta velocidad, o incrementar la altura cuando se circula por carreteras en mal estado.

2.1.7. SISTEMAS DE ILUMINACIÓN ADAPTATIVA

El sistema de iluminación de los automóviles tiene la misión de permitir la visibilidad por parte del conductor cuando circula en condiciones de iluminación exterior insuficiente y también para poder identificar al vehículo en dichas condiciones, al tiempo que señala las dimensiones del automóvil (altura y anchura) [6].

El sistema de iluminación adaptativa permite el alumbrado en las zonas frontales y laterales del vehículo, en función del giro realizado con el volante. En este tipo de tecnología se distinguen dos sistemas: el alumbrado lateral y el alumbrado en curva.

El alumbrado lateral es un sistema en el que se proyecta un haz de luz fijo para alumbrar las zonas que quedan a los lados del coche cuando va a realizar un giro cerrado a poca velocidad. Generalmente se emplea el proyector antiniebla delantero, como se puede ver en la Figura 2-6.

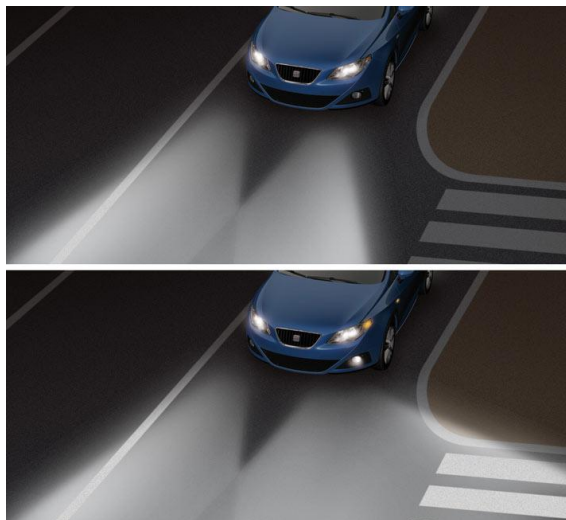


Figura 2-6 Alumbrado lateral

En el alumbrado en curva, ver Figura 2-7, un proyector gira dentro del faro en función de los cambios de dirección del coche. Normalmente, el giro está limitado a 15 grados.



Figura 2-7 Alumbrado en curva

2.1.8. OTROS SISTEMAS

Hay otros sistemas de ayuda a la conducción: detección de objetos en ángulo muerto, asistente para cambio de carril, sistema de control de crucero adaptativo, e incluso otros sistemas más sofisticados como visión nocturna (dispositivo que no sustituye en ningún caso el alumbrado convencional).

El sistema de detección de objetos en ángulo muerto tiene como objetivo alertar al conductor si hay otro vehículo en el ángulo muerto o cerca de él. Este sistema consta de varios sensores que vigilan constantemente la zona lateral próxima al coche. Estos sensores proporcionan información a una centralita de control que, en caso necesario, emite un aviso acústico, visual o una combinación de ambos. La zona de detección abarca un área de 10 metros por detrás del espejo retrovisor por 4 metros de ancho, suficiente para cubrir el ángulo muerto [4].

Este sistema puede alertar de forma continua de la existencia de vehículos en el ángulo muerto independientemente de las intenciones del conductor, o por el contrario, alertar cuando el conductor expresa la voluntad de efectuar un cambio de carril mediante el uso del intermitente.

El asistente para cambio de carril es un sistema que amplía las posibilidades de funcionamiento del sistema de detección de objetos en ángulo muerto. La distancia de detección aumenta hasta 50 ó 60 metros por detrás del vehículo y en los carriles adyacentes al mismo. Además este sistema tiene en cuenta la velocidad relativa del vehículo detectado en dicha zona con respecto al propio. De esta forma, se puede alertar al conductor en caso de existir un cierto riesgo al efectuar la maniobra de cambio de carril debido a la aproximación de otro vehículo a gran velocidad [4].

El sistema de visión nocturna ofrece mejor visibilidad que las luces de cruce por la noche gracias a unos sensores de infrarrojos cuyo alcance es equivalente al de las luces de carretera. El sistema no deslumbra al tráfico de frente, ya que los infrarrojos son invisibles para el ojo humano. La escena iluminada se muestra al conductor en una pantalla especial que ofrece una mejor visión de la carretera, incluidos otros vehículos y obstáculos distantes; de esta manera, el conductor puede detectarlos con mayor antelación [4].

El control de cruceo adaptativo (ACC) es un sistema que mantiene automáticamente una distancia de seguridad, preseleccionada por el conductor, respecto al vehículo que circula delante. Este sistema emplea un radar, ubicado detrás de la parrilla del radiador, y diferentes detectores. El dispositivo reconoce el vehículo que precede y automáticamente mantiene la distancia de seguridad preseleccionada por el conductor. Cuando la distancia es menor al valor preestablecido, el sistema produce instantáneamente la desaceleración del vehículo actuando sobre los frenos. Cuando es necesario desacelerar con mayor rapidez, por ejemplo en caso de que el vehículo que va delante frene bruscamente, el sistema previene al conductor mediante un aviso luminoso y sonoro, que le sugiere que accione los frenos [10].

2.2. SEGURIDAD PASIVA

La seguridad pasiva reduce al máximo los daños que se pueden producir cuando el accidente es inevitable. Los elementos del automóvil más destacados que forman parte de la seguridad pasiva son: los cinturones de seguridad, el airbag, los reposacabezas, el bastidor y la carrocería [3].

2.2.1. CINTURÓN DE SEGURIDAD

El cinturón de seguridad es un elemento importante de la seguridad pasiva de los vehículos. La utilización de este dispositivo de retención es obligatorio tal y como viene indicado en el *Reglamento de Circulación y Seguridad Vial*. Conducir sin cinturón de seguridad está penado con la pérdida de 3 puntos en el carné de conducir [4].

La finalidad del cinturón de seguridad es retener y proteger al conductor y al resto de ocupantes del vehículo en caso de que sufran una parada repentina como resultado de una colisión o un frenazo brusco. Garantizando que, por la acción de la fuerza de inercia, no se desplacen o no salgan despedidos los ocupantes del interior de la célula de seguridad del automóvil.

Según estima el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), en caso de impacto, el cinturón de seguridad puede reducir el riesgo de muerte para los ocupantes de los asientos delanteros en un 50% [11].

Este dispositivo de retención tiene su origen en el sector de la automoción, en los años 50 cuando Nils Bohlin traspasó sus conocimientos de aeronáutica al fabricante de automóviles sueco, Volvo. Después de los dos modelos de cinturón de seguridad de la época, uno era abdominal y otro era torácico, en 1959 se introduce, como combinación de los dos modelos anteriores, el cinturón de seguridad de tres puntos de anclaje, cuya utilización actualmente está estandarizada en todos los vehículos.

Los cinturones actuales tienen: pretensor y limitador de tensión. El pretensor es un dispositivo que tiene como función ceñir el cinturón lo máximo posible al cuerpo del ocupante en caso de colisión. Este sistema actúa dando un tirón al cinturón, evitando que haya la mínima holgura en el momento de la colisión. Hay varios mecanismos para realizar esta función, unos son mecánicos (muelles) y otros, los más extendidos, pirotécnicos (una pequeña carga explosiva hace que un pistón se desplace. Al avanzar, hace girar la bobina en la cual está enrollado el cinturón de seguridad y tire del mismo), este tipo de sistema es que se muestra en la Figura 2-8.

Si existiera holgura (evitada por el pretensor) entre el ocupante y el cinturón, el resultado sería que el cuerpo chocaría contra el cinturón ya bloqueado. Mediante una colocación correcta del cinturón de seguridad, la mayor parte de la fuerza de retención será aplicada sobre dos zonas del cuerpo resistentes, como son el pecho y la pelvis.

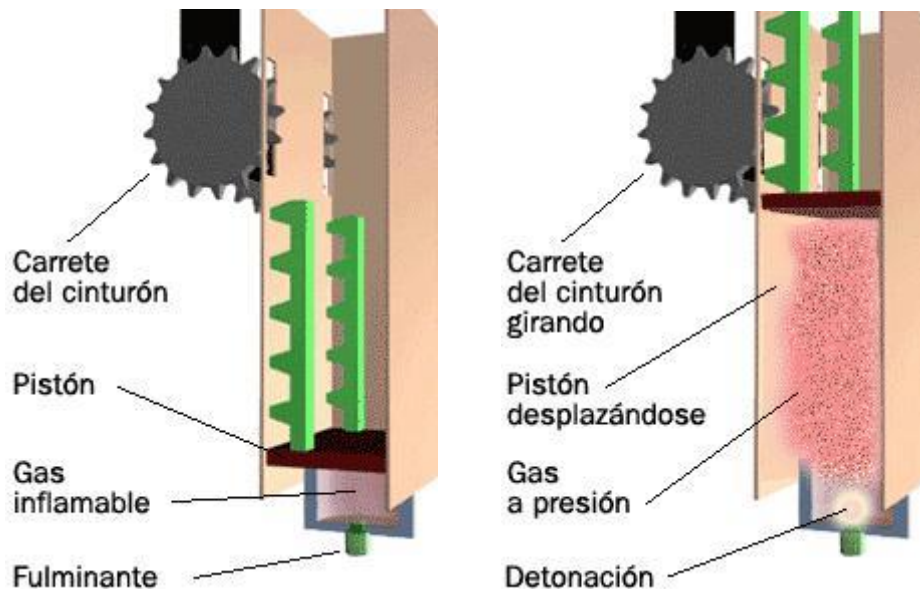


Figura 2-8 Pretensor pirotécnico

El limitador de tensión empieza a actuar después de la intervención del pretensor. El cinturón de seguridad ya está bloqueado y sujetando al cuerpo. Si el choque es muy violento, la presión del cinturón puede provocar daños importantes, como la rotura de una costilla. El limitador de tensión permite que el punto de fijación del cinturón se estire controladamente, para limitar la presión que hay entre el cuerpo y el cinturón.

Además, los cinturones de seguridad actuales tienen un sistema para bloquear la cinta en lugar del carrete donde está enrollado. De esta manera se consigue eliminar la posible holgura que haya cogido al enrollarse.



2.2.2.AIRBAG

El airbag (bolsa de aire) es un elemento de seguridad pasiva muy importante en los vehículos actuales. Para que este dispositivo sea realmente eficaz, los ocupantes del automóvil deben llevar puesto el cinturón de seguridad, ya que en caso contrario el impacto con el airbag puede causar graves lesiones [11].

El objetivo del airbag es detener el cuerpo de los ocupantes de un vehículo lo más suavemente posible, para que las fuerzas sean menores de las que sufriría si la parada fuera instantánea. En definitiva, este sistema permite amortiguar el golpe del cuerpo contra el volante, el salpicadero, el parabrisas, las puertas o las ventanillas laterales.

Este componente de la seguridad pasiva está constituido por:

- Una bolsa inflable (bag), fabricada en nailon. Está plegada en el lugar donde sea necesario introducir un efecto amortiguador del golpe.
- Un detector de impacto que detecta cuándo se produce un choque y activa el inflado del airbag.
- Un sistema de inflado, basado en una reacción química que se produce de modo casi explosivo y da lugar a un gran volumen de gas nitrógeno. Esta reacción es activada por un sistema eléctrico controlado por el detector de impacto. Los gases producidos de modo explosivo alcanzan suficiente presión como para inflar el airbag en 20 centésimas de segundo. La secuencia de llenado se puede ver en la Figura 2-9.

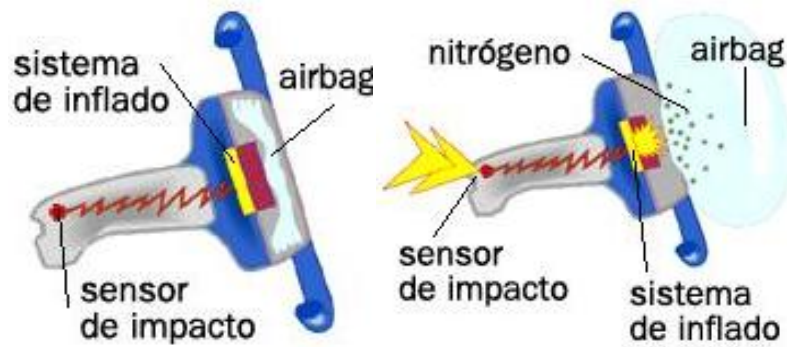


Figura 2-9 Llenado del Airbag

Para permitir la movilidad de los ocupantes, instantes después de que el airbag se infle, el gas comienza a disiparse a través de pequeños orificios existentes en la tela.

Actualmente existen distintos tipos de airbag en función de la parte del cuerpo que tenga que retener: frontales para conductor y acompañante (ubicados en el volante y salpicadero); laterales (situados en los laterales de los asientos o en el guarnecido de las puertas para evitar lesiones de tórax), tipo cortina (ubicados en los laterales del techo para proteger la cabeza) y para las rodillas (emplazado en la parte baja del salpicadero).

2.2.3. REPOSACABEZAS

El reposacabezas es un elemento que forma parte de la seguridad pasiva cuyo objetivo no es el confort sino evitar lesiones cervicales como el latigazo cervical o *whiplash* como se puede ver en la Figura 2-10 [12].

Generalmente, el latigazo cervical se produce en golpes por alcance trasero, incluso a velocidades moderadas. Es consecuencia del desplazamiento hacia atrás que sufre la cabeza, al verse acelerado el vehículo, por efecto del impacto trasero ocasionado por otro vehículo.



Figura 2-10 Latigazo cervical

La misión principal del reposacabezas es reducir, en la medida de lo posible, lesiones cervicales. La protección que proporciona el reposacabezas consiste en limitar tanto el desplazamiento hacia atrás de la cabeza, como la velocidad de dicho desplazamiento. De este modo, las vértebras cervicales no se ven sometidas al extraño movimiento de hiperextensión que ocasiona el latigazo cervical y para el cual no es encuentra preparada la estructura flexible del cuello.

Se han realizado grandes avances, así, los nuevos vehículos incorporan mayoritariamente reposacabezas regulables en todas sus plazas. También empieza a extenderse el uso de los denominados reposacabezas activos (AHR: Active Head Restraint).

2.2.4. BASTIDOR Y CARROCERIA

Un vehículo necesita una estructura en la que acoplar los distintos componentes, y que a su vez proporcione la resistencia necesaria para soportar las sollicitaciones a las que está sometido, incluyendo esfuerzos adicionales como puede ser un impacto por accidente; en ese caso se debe producir una deformación de forma programada para preservar la seguridad de los ocupantes [6].

Por lo tanto, las funciones de estos elementos estructurales que forman parte de la seguridad pasiva son: por parte de la carrocería, aportar cierta rigidez estructural, y por parte del bastidor, soportar la mayor parte de las cargas. Aunque, actualmente, la mayoría de los automóviles están formados por carrocerías autoportantes como la que se muestra en la Figura 2-11, que pueden soportar mayores solicitaciones, ya que deben resistir el propio peso de la carrocería y también el peso del resto de componentes del vehículo, a la vez que proporciona rigidez estructural.

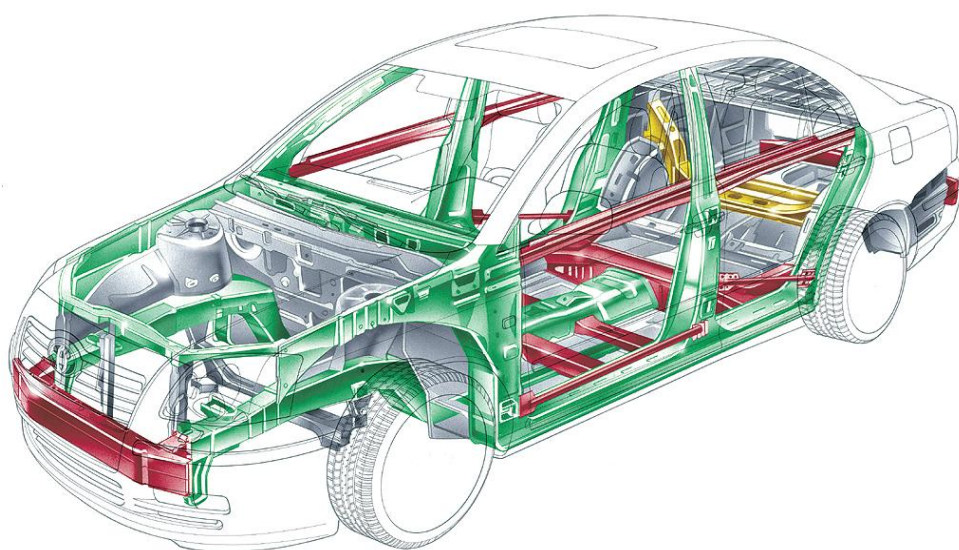


Figura 2-11 Carrocería autoportante

Es importante indicar que la deformación del bastidor y de la chapa, causada por un impacto, implica disipación de energía, por lo tanto de cómo y cuánto se deformen éstos y cuál sea su diseño, dependerán los daños de los ocupantes y peatones, en caso de atropello. Una deformación excesiva puede provocar intrusión en el interior del habitáculo de elementos tan considerables como el motor, en cambio, si no se produce deformación o ésta es mínima, el impacto sería muy brusco, con los daños físicos que provocaría a los ocupantes.



3. EURONCAP

Antes de que se comercialice un vehículo, éste debe pasar unas pruebas de seguridad. La legislación establece unos requisitos mínimos de seguridad que deben ser superados, con este fin, surgió EuroNCAP, para alentar a los fabricantes a superar dichos requisitos [13].

EuroNCAP, fundada en 1997, es un organismo europeo, ubicado desde 1999 en Bruselas, que proporciona información a los consumidores y a la industria de la automoción de la seguridad de los nuevos vehículos. Cuenta con el apoyo de la Comisión Europea y se ha convertido en el impulsor de mejoras de seguridad en vehículos nuevos. Su nombre procede del acrónimo inglés *Programa Europeo de Evaluación de Coches Nuevos* (Europe New Car Assessment Programme).

3.1. HISTORIA DESDE 1970

Desde la década de 1970, distintos gobiernos europeos han estado trabajando en la evaluación de la seguridad del automóvil.

En la década de 1990, estas investigaciones desembocaron en el desarrollo, a mayor escala, de pruebas para la protección de los ocupantes ante situaciones de impacto frontal y lateral y protección de los peatones en caso de atropello.

En 1994 el gobierno británico puso en marcha un NCAP (New Car Assessment Programme). En julio de 1995, la Comisión Europea debatió la posible ampliación de este organismo al resto de Europa y, tras realizar varias pruebas, en 1996 la Federación Internacional del Automóvil (FIA) se unió al programa, formando el actual organismo EuroNCAP. Los primeros resultados de protección de ocupantes y protección de peatones se ofrecieron en febrero de 1997, evaluación que fue criticada por los fabricantes al considerar que el nivel de exigencia era elevado y creían complicado obtener cuatro estrellas.

En julio de 1997, el Volvo S40 alcanzó cuatro estrellas en protección de ocupantes, aspecto que evolucionaba favorablemente, mientras que las mejoras en protección de peatones fueron más lentas. En junio de 2001, el Renault Laguna fue el primer coche que consiguió las 5 estrellas en protección de ocupantes. Desde este año, la severidad en la evaluación de los vehículos fue incrementando, llegando a incluir en noviembre de 2003 la evaluación en protección de niños.

En febrero de 2008, se empezó a evaluar los vehículos todo-terreno, dada su creciente comercialización, pero ninguno alcanzó más de 4 estrellas en protección de ocupantes. En noviembre de este mismo año, se iniciaron pruebas para evaluar el latigazo cervical (whiplash). A partir de esta prueba, en febrero de 2009, se estableció el nuevo criterio de evaluación, ya que muchos automóviles obtenían cinco estrellas en protección de ocupantes, pero solo dos estrellas en protección de peatones.

El nuevo sistema de calificación sigue teniendo como máximo las 5 estrellas, premiando la seguridad general del vehículo: protección que se ofrece a adultos y niños ocupantes, así como a peatones; además considera la seguridad que ofrece la tecnología de asistencia al conductor como el control de estabilidad o el sistema limitador de velocidad.

3.2. PRUEBAS EURONCAP

3.2.1. IMPACTO FRONTAL

En esta prueba se simula un impacto frontal entre dos coches en la que el vehículo a ser evaluado es sometido, con una velocidad de 64 km/h, a un choque frontal contra una barrera de aluminio deformable, como se puede ver en la Figura 3-1. Debido a que la mayoría de los accidentes sólo se ve involucrada una parte del frontal del coche, en la prueba se simula impactando sólo el 40% del frontal del vehículo. El empleo de una barrera deformable (y no rígida) se debe a la representación de la deformabilidad de los turismos.



Figura 3-1 Esquema de choque frontal

La velocidad de la prueba de 64 km/h simula una colisión a una velocidad de 55 km/h, esta diferencia de velocidades se debe a la energía absorbida por la cara deformable, cuyo ensayo de un caso real se puede ver en la Figura 3-2.

Este ensayo abarca una proporción significativa de los accidentes y representa la capacidad del coche para soportar el impacto sin sufrir la intrusión de ningún elemento en el habitáculo. Los resultados obtenidos de los dummies permiten evaluar la seguridad de los ocupantes.



Figura 3-2 Ensayo EuroNCAP choque frontal

3.2.2. IMPACTO LATERAL

Segunda prueba más importante de colisión, en la que una barrera deformable impacta contra el lateral del vehículo por el lado del conductor a una velocidad de 50 km/h, como se puede ver en la Figura 3-3.

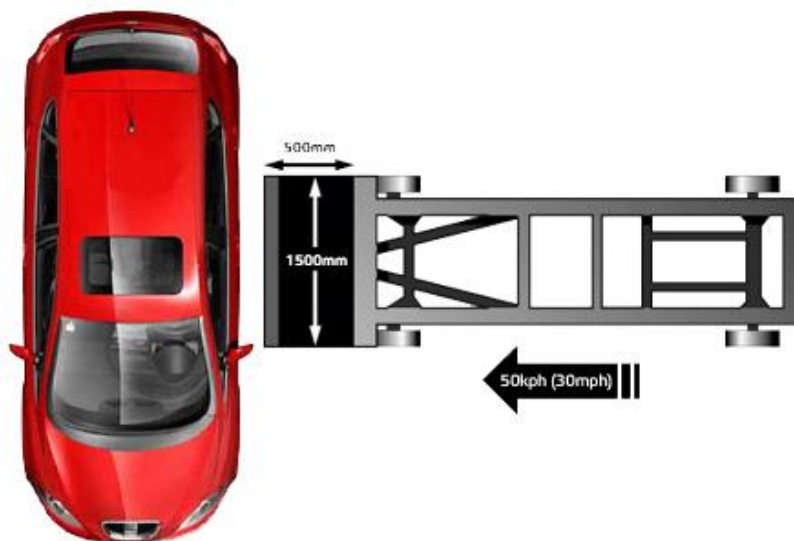


Figura 3-3 Esquema de choque lateral

De forma análoga al caso anterior, los resultados se extraen analizando los daños sufridos por el dummy. Gracias a esta prueba se han realizado grandes avances en la seguridad de lateral de los vehículos con la inclusión de airbags laterales, como se puede ver en la Figura 3-4.



Figura 3-4 Ensayo EuroNCAP choque lateral

3.2.3. IMPACTO LATERAL CONTRA POSTE

En esta prueba, como se puede ver en la Figura 3-5, el vehículo probado es propulsado lateralmente a una velocidad de 29 km/h contra un poste rígido. Este poste es relativamente estrecho, lo que provoca una gran penetración en el lateral del coche.

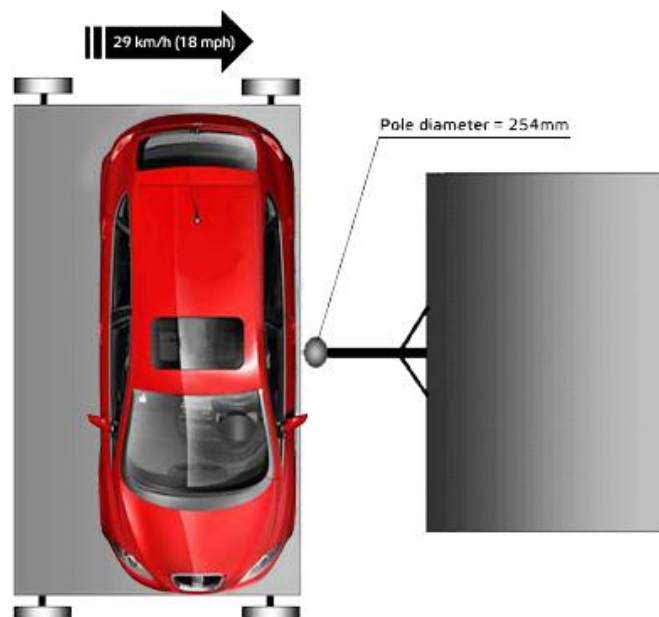


Figura 3-5 Esquema de choque contra poste

Con el objetivo de alentar a los fabricantes a progresar en materia de seguridad, desde el año 2009, la prueba de impacto lateral contra poste es obligatoria. Actualmente incluye evaluación de daños en pecho y abdomen. Este test de seguridad, junto con la prueba de impacto lateral, ha provocado que los vehículos lleven instalados los airbag laterales, como se puede ver en la prueba que se muestra en la Figura 3-6.



Figura 3-6 Ensayo EuroNCAP choque contra poste

3.2.4. PROTECCIÓN INFANTIL

En las pruebas de impacto frontal y lateral contra barrera, también se emplean dummies más pequeños, que representan niños de 1 año y medio y 3 años de edad. Estos dummies van ubicados en la parte trasera del coche con el tipo de retención para niños que recomienda el fabricante del vehículo.

La calificación no sólo depende de cómo se ve afectada la sillita del niño en las pruebas mencionadas, sino también de las instrucciones de montaje y de las etiquetas de advertencia de los airbag. En definitiva es una evaluación de la combinación coche-asiento.

3.2.5. PROTECCIÓN DE PEATONES

Para el análisis de la protección de los peatones, se realizan una serie de pruebas para reproducir los accidentes con los niños y adultos, donde los peores efectos aparecen a 40 km/h.

Debido a la dificultad de evaluar la protección de los peatones con un dummy completo, se emplean componentes individuales: en el ensayo de la pierna se evalúa el daño producido por el parachoques, en el ensayo del muslo se evalúa el borde del capó y en el ensayo de la cabeza (tanto niño como adulto) se evalúa el área superior del capó, como se observa en la Figura 3-7.



Figura 3-7 Impacto del cuerpo sobre el coche

3.2.6. LATIGAZO CERVICAL (WHIPLASH)

Prueba incluida en la evaluación de los vehículos desde enero de 2009; se realiza con un asiento montado sobre un trineo de pruebas, sometidas a bajos, moderados y altos niveles de gravedad que representa una amplia gama de fuerzas de choque. En esta prueba influye el asiento, y la geometría y diseño del reposacabezas.

3.2.7. ELECTRONIC STABILITY CONTROL (ESC)

Actualmente, no existe una prueba única o combinación de pruebas en la que se pueda evaluar la seguridad del sistema electrónico de control de estabilidad, pero desde 2008, EuroNCAP, para promover el montaje general del ESC por todos los fabricantes de vehículos, concede tres puntos al coche si está equipado de serie en toda su gama de modelos.

3.2.8. SEAT BELT REMINDER (SBR)

Sistema electrónico que a través de señales acústicas y luminosas (en el salpicadero), recuerda al conductor y al resto de ocupantes el uso del cinturón de seguridad en caso de que el vehículo arranque y éstos no lo lleven abrochado. La evaluación intenta recrear todos los escenarios posibles en que un ocupante podría ser vulnerable por ir sin cinturón de seguridad, y comprueba si el sistema responde adecuadamente. La duración y el volumen de la señal acústica y la claridad de la señal visual, si es visible para los ocupantes de diferentes tamaños, son los aspectos evaluados.

3.2.9. SISTEMAS DE LIMITACIÓN DE VELOCIDAD

EuroNCAP premia actualmente dos tipos de sistemas: los sistemas en los que el límite de velocidad lo puede establecer el conductor y que impiden que el automóvil pueda exceder el máximo de velocidad establecido, y los sistemas que simplemente advierten al conductor cuando la velocidad del coche está por encima del máximo establecido. En estos sistemas se evalúa que se puedan activar y desactivar fácilmente (sin distracciones innecesarias) y la claridad de las señales al conductor. También se comprueba que los sistemas son capaces de limitar la velocidad establecida por el conductor.

3.3. VALORACIÓN DE EURONCAP

Antes de 2009, EuroNCAP publicaba tres valoraciones (por separado): protección de adultos, protección infantil y protección de peatones. A partir del año 2009, EuroNCAP realiza una calificación global en función de cuatro aspectos: la protección de los adultos, la protección infantil, protección de los peatones y sistemas de asistencia a la seguridad.

La protección de adultos es evaluada mediante las tres pruebas de impacto comentadas en el apartado 3.2. Además la calificación se completa con la evaluación de la prueba de latigazo cervical (whiplash), que se realiza por separado como se ha indicado en el apartado 3.1.

Los resultados de los impactos se muestran mediante un código de colores (verde: bueno, amarillo: aceptable, naranja: marginal, marrón: débil y rojo: pobre), representados sobre un dummy, como se muestra en la Figura 3-8.



Figura 3-8: Resultados impacto frontal (conductor y acompañante)

El resto de calificaciones: protección infantil protección de los peatones y sistemas de asistencia a la seguridad; se extraen de las pruebas expuestas en el apartado 3.2.



4. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Actualmente, dada la creciente complejidad de los estudios e investigaciones a realizar, sería muy difícil su resolución empleando únicamente métodos analíticos. Para reducir esta complejidad, se emplean herramientas informáticas que recrean con gran fidelidad estas simulaciones.

Para poder abordar este tipo de problemas, matemáticos e ingenieros dividen el sistema a analizar en elementos (componentes individuales): Método de Elementos Finitos, será desarrollado más detalladamente en el apartado 4.1.

De esta manera, se puede analizar de un modo más sencillo su comportamiento. Con los resultados obtenidos de dicho análisis individualizado sobre cada elemento, se reconstruye el sistema inicial y se obtiene el comportamiento global [14].



Realizando la división del sistema a analizar en elementos, se llega a:

- Sistema discreto: el sistema a analizar está dividido de forma natural en elementos claramente definidos. Estos sistemas son fácilmente resolubles mediante el uso de ordenadores.
- Sistema continuo: el sistema no puede ser dividido de forma natural en unidades simples, teniendo que recurrir a la resolución analítica de ecuaciones diferenciales, complicando el proceso.

4.1. PRINCIPIO Y APLICACIONES

El Método de los Elementos Finitos (M.E.F.), introducido en el apartado anterior, consiste en la conversión del problema con infinitos grados de libertad, en un problema finito en el que intervenga un número concreto (finito) de variables asociadas a ciertos puntos característicos del sistema, conocidos como nodos.

Como se ha comentado anteriormente, las aplicaciones prácticas de la mecánica del sólido deformable se pueden agrupar en: sistemas discretos y sistemas continuos.

En el Método de Elementos Finitos, es importante destacar dos conceptos que se emplean frecuentemente en este tipo de simulaciones:

- Discretización: transformación del problema inicial en un modelo discreto aproximado.
- Interpolación: aproximación de los valores de una función a partir de su conocimiento en un número discreto de puntos.

En el M.E.F. el dominio se divide en elementos (número finito de formas simples). En el caso de problemas de mecánica de sólidos, el dominio es el sólido. El comportamiento en el interior de cada elemento queda definido mediante una interpolación a partir de lo que sucede en los nodos. Al ser un método aproximado, la precisión de los resultados está en función de la cantidad de elementos empleados, por lo tanto, para obtener una solución más fiable, hay que incrementar el número de elementos.

Esta metodología se ha convertido en un potente método para resolver cualquier tipo de problema físico, incluyendo distintas áreas como la transferencia de calor, magnetismo, mecánica de fluidos, a parte de la ya citada mecánica de sólidos, objeto de este proyecto. Debido a que el Método de Elementos Finitos es una discretización del problema real, es importante saber qué tipo de simplificaciones se realizan, ya que éstas pueden afectar de forma importante al resultado final. También hay que indicar que es imprescindible saber interpretar los resultados obtenidos dado que es un método aproximado, con el riesgo que ello implica. En la Figura 4-1 se puede ver una comparativa entre un modelo real y el mismo vehículo desarrollado por el software de elementos finitos que se va a utilizar en este proyecto: LS-DYNA, del que posteriormente se hablará en apartado 4.2.

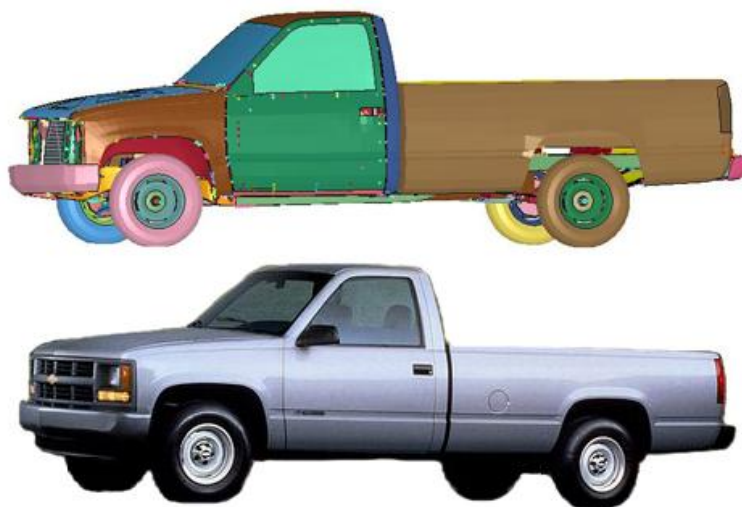


Figura 4-1 Comparativa modelo simulación y modelo real



Además de todas las particularidades indicadas anteriormente, con este método se pueden abordar problemas no lineales. En el caso de la mecánica de sólidos, para que un problema sea considerado lineal, las deformaciones producidas tienen que ser pequeñas. En el caso que nos ocupa en este proyecto, el problema adquiere carácter no lineal dado que en un choque de un vehículo contra una barrera se van a producir grandes deformaciones, por tanto los materiales, encargados de absorber la energía provocada por el impacto, entrarán en la zona plástica, donde desaparece la linealidad entre tensión y deformación.

4.2. LS-DYNA

LS-DYNA es un paquete de software de elementos finitos capaz de simular problemas complejos del mundo real. Ha sido desarrollado específicamente para la industria del automóvil y aeroespacial [15], [16] y [17].

Sus características más destacadas son:

- La metodología de resolución está basada en integración explícita.
- Un algoritmo de impacto y contacto permite tratar problemas complejos de la realidad, incluyendo transferencia de calor a través de las superficies en contacto.
- La especialización del algoritmo de contacto hace que no sea necesario mallar las zonas de transición para obtener resultados fiables.

- Gran especialización en la industria del automóvil, incluyendo como elementos más destacados: airbags, cinturones de seguridad y sensores.
- Para elementos bi-dimensionales es capaz de refinar la malla durante el procesado en función de los resultados, para obtener así mayor precisión en las zonas que lo requieran.

LS-DYNA tiene su origen en mitad de la década de los setenta en el Lawrence Livermore Nacional Laboratory (LLNL) con el desarrollo del software "Dyna3D". En la evolución de este programa hay que destacar a Juan O. Hallquist como uno de los principales investigadores en el desarrollo de LS-DYNA, cuyo primer manual se lanzó para la distribución pública en agosto de 1976.

A partir de esta fecha, este software fue progresando hasta llegar a especializarse en la ingeniería de automóviles, concretamente en la simulación de accidentes, como se puede ver en la Figura 4-2, donde se muestra una prueba de impacto simulada. De esta forma, actualmente, se consigue ahorro de tiempo y dinero por parte de las compañías de automóviles, ya que las simulaciones de choques son fieles a la realidad y las compañías pueden probar sus diseños sin tener que construir para ello un prototipo.

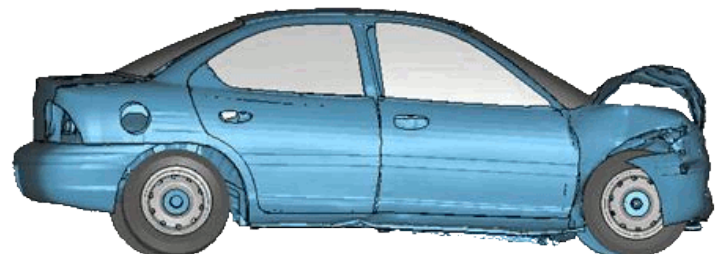


Figura 4-2 Simulación de prueba de impacto



LS-DYNA permite analizar grandes deformaciones de problemas estáticos o dinámicos de estructuras incluyendo su interacción con fluidos. Además, incorpora, entre otras capacidades, elementos explícitos bi-dimensionales y tri-dimensionales, análisis automático de contactos (superficie única, superficie-superficie y nodo-superficie), decenas de modelos de materiales y ecuaciones constitutivas, y un variado abanico de posibilidades de simulación.

La empresa Livermore Software Technology Corporation (LSTC) ha sido quien ha desarrollado el software LS-DYNA, esta empresa permite descargar de su página web (www.lstc.com) el pre y post-procesador diseñado expresamente para LS-DYNA, LS-PREPOST, que es el programa que se ha utilizado en este proyecto.

LS-PREPOST es un programa interactivo avanzado para la preparación de datos de entrada para LS-DYNA y procesamiento de los resultados de los análisis del programa. Como preprocesador tiene aplicaciones específicas orientadas al sector de la automoción (implementación de airbags, cinturones de seguridad, modelos dummy, sensores, acelerómetros, etc.) Por otra parte, como post-procesador permite la visualización de resultados (gráficas de desplazamientos de los nodos, velocidades, aceleraciones, tensiones de Von-Mises, etc.), incluso realiza el cálculo de parámetros más específicos que permiten evaluar el nivel de daños en la cabeza y el tórax del dummy: HIC (Head Injury Criterion) y el CSI (Chest Severity Index), respectivamente.



5. MODELOS SIMULADOS

Los modelos empleados en las simulaciones sirven para mostrar una comparativa objetiva, a través del cálculo del índice ASI (Acceleration Severity Index), entre distintos tipos de vehículos ante diferentes tipos de barreras y de impactos (frontal y lateral).

En este proyecto se emplean cuatro modelos distintos de elementos finitos, cuyas características, geometría y material se desarrollan en los siguientes apartados. Estos modelos son: vehículo tipo todo-terreno, vehículo tipo turismo, barrera de seguridad metálica y barrera de seguridad de hormigón. Cada vehículo impacta frontal y lateralmente con cada una de las barreras.

El sistema de referencia empleado en cada caso, se indica posteriormente en los apartados 5.1.3 y 5.2.3.

Indicar la importancia de las unidades en LS-DYNA, ya que deben ser determinadas por el usuario. La elección de las mismas debe ser coherente para poder interpretar correctamente los resultados finales.

Las unidades elegidas en este proyecto se muestran en la Tabla 5-1.

| Magnitud | Unidad de medida |
|----------|------------------|
| Masa | Kg |
| Tiempo | s |
| Longitud | mm |

Tabla 5-1 Unidades de medida

5.1. VEHÍCULO TIPO TODO-TERRENO

Uno de los vehículos empleados en este proyecto para la simulación de las pruebas de impacto es un Chevrolet C1500 del año 1994 elaborado por NCAC. Se encuentra disponible en la página web de NCAC accesible al público. En la Figura 5-1 se puede ver el modelo empleado [18].

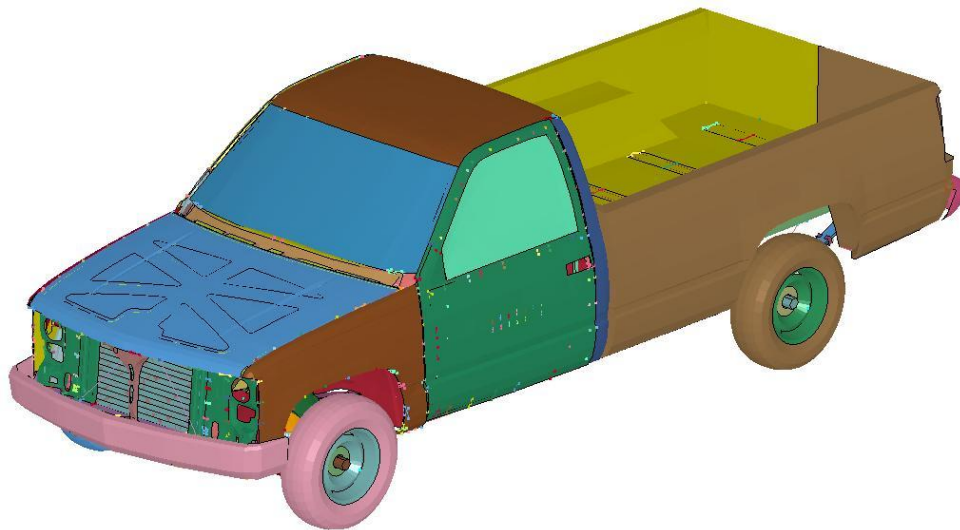


Figura 5-1 Chevrolet C1500 LS-DYNA

Como ya se ha indicado en el capítulo 4, es un modelo de elementos finitos, que está formado por 251 partes y 66.586 nodos. Estos datos reflejan el intento de aproximar lo máximo posible el modelo simulado al modelo real, cuya comparativa se mostró en la Figura 4-1 del apartado 4.1.

Aunque en este proyecto no es el objetivo analizar el diseño del vehículo, se va a describir características básicas relativas tanto a la geometría como a los materiales empleados.

5.1.1.GEOMETRÍA

Prácticamente la totalidad del vehículo está modelado con elementos tipo SHELL, en concreto 54.565 elementos. Destacar, sobre todo, las partes que conforman la estructura del vehículo como son los dos largueros en la dirección longitudinal del vehículo, los pilares, el techo y las barras laterales situadas en las puertas, cuyo diseño es especialmente importante a la hora de minimizar los daños como consecuencia de la colisión. La estructura se puede ver en la Figura 5-2.

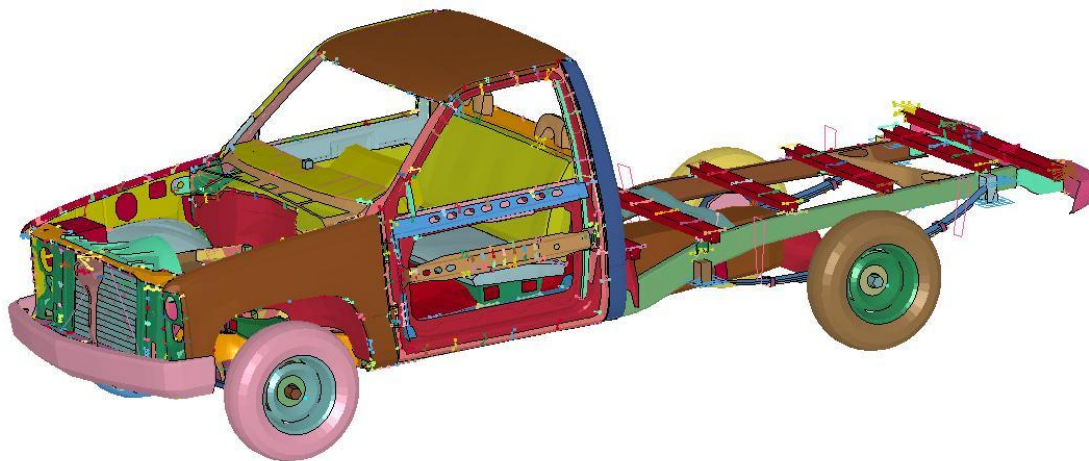


Figura 5-2 Estructura Chevrolet C1500 LS-DYNA



En la Tabla 5-2 se muestran los datos principales del vehículo que serán utilizados posteriormente:

| | Chevrolet C 1500 Pickup Truck |
|------------------------------|--------------------------------------|
| Medida Neumático | P225/75 R15 |
| Masa | 1741 Kg |
| Distribución peso (del/tras) | 58.2% / 41.8% |
| Batalla | 3340 mm |

Tabla 5-2 Datos del vehículo tipo todo-terreno

5.1.2.MATERIALES

La mayor parte de las piezas del vehículo empleado en la simulación están constituidas por materiales del tipo `PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY`, es decir, materiales de comportamiento elasto-plástico en los que la tensión es linealmente dependiente de la deformación hasta que se supera el límite elástico. Cuando esto ocurre, el material entra en plasticidad y desaparece la linealidad entre tensión y deformación, experimentando grandes deformaciones, lo cual contribuye a absorber la energía del impacto.

Están definidos con este tipo de material componentes estructurales longitudinales, parachoques delantero, toda la carrocería del vehículo, algunas piezas del motor y las llantas. Los parámetros de este material se pueden observar en la Tabla 5-3.



| | |
|----------------------------|-------------------------------|
| Densidad ρ | 1.300e-008 Kg/mm ³ |
| Módulo de Young E | 2.000e+005 MPa |
| Coeficiente de Poisson | 0.3000000 |
| Límite elástico σ_y | 385 MPa |
| Densidad ρ | 7.890e-009 Kg/mm ³ |
| Módulo de Young E | 2.000e+005 MPa |
| Coeficiente de Poisson | 0.3000000 |
| Límite elástico σ_y | 270 MPa |
| Densidad ρ | 7.890e-009 Kg/mm ³ |
| Módulo de Young E | 2.000e+005 MPa |
| Coeficiente de Poisson | 0.3000000 |
| Límite elástico σ_y | 350 MPa |

Tabla 5-3 Piecewise Linear Plasticity Chevrolet

Otro tipo de material definido y empleado en menor proporción es el tipo RIGID. Este tipo de material considera al cuerpo como sólido rígido. Las partes del vehículo que se han definido con este tipo de material son: frenos, árbol de transmisión, diferencial, algunas piezas del motor, ballestas, barra de dirección y elementos estructurales transversales. Los parámetros de este material se pueden observar en la Tabla 5-4.

| | |
|------------------------|-------------------------------|
| Densidad ρ | 7.890e-009 Kg/mm ³ |
| Módulo de Young E | 2.000e+005 MPa |
| Coeficiente de Poisson | 0.3 |
| Densidad ρ | 2.350e-008 Kg/mm ³ |
| Módulo de Young E | 2.000e+005 MPa |
| Coeficiente de Poisson | 0.3 |

Tabla 5-4 Rigid Chevrolet



Además de los materiales indicados anteriormente, también se han definido otro tipo de materiales que se han utilizado en otras piezas del coche. Debido a que se emplean en muy pocas piezas, simplemente se van a enunciar: BLATZ-KO_RUBBER, DUMPER_VISCOUS, ELASTIC, HONEYCOMB, NULL, SPRING_ELASTIC y SPRING_NONLINEAR_ELASTIC.

5.1.3.VELOCIDAD INICIAL

Para dotar al vehículo de una velocidad inicial en las cuatro simulaciones que se van a realizar en este proyecto con el Chevrolet C1500, choque contra barrera metálica (frontal y lateral) y choque contra barrera de hormigón (frontal y lateral), se emplea la función de LS-PREPOST *INITIAL_VELOCITY_GENERATION.

La velocidad inicial que se da al vehículo es de 64 km/h, en los impactos frontales, y 50 km/h, en los impactos laterales. Se han seleccionado estas velocidades teniendo en cuenta que en las pruebas de impacto EuroNCAP es la velocidad empleada; ya que considera que en situaciones reales el conductor, antes del impacto, ha reducido la velocidad.

La orientación de los ejes, en ambas simulaciones de impacto frontal, es que se hace coincidir el eje X con el eje longitudinal del vehículo, siendo éste el sentido de avance del vehículo. Con esta situación, el eje Y es el eje de rotación de las ruedas. Con esta condición inicial, se procede a introducir la velocidad en el vehículo como se indica a continuación:

- Velocidad lineal de avance del vehículo de 64 km/h:

$$V_x = 1.778 \times 10^4 \text{ mm/s}$$



- Velocidad angular de las ruedas del vehículo (ω), cuyo valor viene determinado por el radio nominal de la rueda (r_n) y la velocidad lineal indicada anteriormente (V_x), cumpliendo la expresión mostrada a continuación:

$$V_x = \omega_y \times r_n \quad \text{Ecuación 1}$$

El radio nominal se obtiene de los datos técnicos de que se han expuesto en la Tabla 5-2. En este caso la medida de las cuatro ruedas es 225/75 R15, el radio nominal se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$r_n = \frac{D_L}{2} \times 25.4 \frac{mm}{pulgada} + \frac{R_n}{100} \times A_n \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde: D_L es el diámetro de la llanta en pulgadas.
 R_n es la relación nominal de aspecto en tanto por cien.
 A_n es la anchura nominal del neumático en mm.

Con los datos mostrados en la Tabla 5-2 y empleando la ecuación 2, se obtiene:

$$r_n = \frac{15}{2} \times 25.4 + \frac{75}{100} \times 225 = 359.25 \text{ mm}$$

Por lo tanto con la ecuación 1 se obtiene finalmente la velocidad angular:

$$\omega_y = 49.49 \text{ rad/s}$$

- Finalmente, en la Tabla 5-5 se indican las coordenadas de los ejes de rotación de las ruedas.

| | XC mm | ZC mm |
|---------------|-------|-------|
| Eje Delantero | 3649 | 343 |
| Eje Trasero | 270 | 355 |

Tabla 5-5 Centros de rotación neumáticos Chevrolet



La orientación de los ejes, en ambas simulaciones de impacto lateral, es que se hace coincidir el eje longitudinal del vehículo con el eje X. Con esta situación el eje Y, es el sentido de avance del vehículo y el eje de rotación de las ruedas.

Con esta condición inicial, se procede a introducir la velocidad en el vehículo como se indica a continuación:

- Velocidad lineal de avance del vehículo de 50 km/h:

$$V_y = 1.389 \times 10^4 \text{ mm/s}$$

- Se ha dotado al vehículo de velocidad angular en las ruedas, aunque no tendrá influencia sobre el resultado final. Las coordenadas de los centros de rotación de los ejes son los mismo que se mostraron en la Tabla 5-5.

5.1.4.GRAVEDAD

Se ha caracterizado el efecto de la gravedad en el problema imponiéndole una aceleración en dirección vertical y sentido hacia abajo a todos los nodos del vehículo mediante el comando *LOAD_BODY_Z. El valor de la aceleración se introduce como una función del tiempo, en este caso toma el valor constante de $9.8 \times 10^3 \text{ mm/s}^2$.

5.1.5.ACELERÓMETROS

Un acelerómetro es un dispositivo que se instala en puntos concretos de la geometría del vehículo y se utiliza para medir las aceleraciones en distintas zonas.



En el programa LS-PREPOST se representa con una pieza de forma cúbica. Dicha pieza lleva asociada un sistema de coordenadas local caracterizado por los ejes XA, YA, ZA. La información que recoge se registra y almacena para luego, en el post-procesado, obtener la aceleración experimentada por este acelerómetro virtual en cada uno de sus ejes en función del tiempo.

En el vehículo tipo todo-terreno, utilizado en este proyecto, tiene un total de ocho acelerómetros y están ubicados en diferentes zonas como se puede ver en la Figura 5-3. Para facilitar su situación, se indica las posiciones en las que se encuentran en el coche:

- Parte trasera del asiento en el lado del conductor.
- Parte trasera del asiento en el lado del co-piloto.
- Parte superior de la zona central del motor, escorado ligeramente a la izquierda.
- Parte inferior de la zona central del motor, escorado ligeramente a la izquierda.
- Eje delantero parte izquierda.
- Eje delantero parte derecha.
- Salpicadero.
- Parte central del asiento: CDG del vehículo.

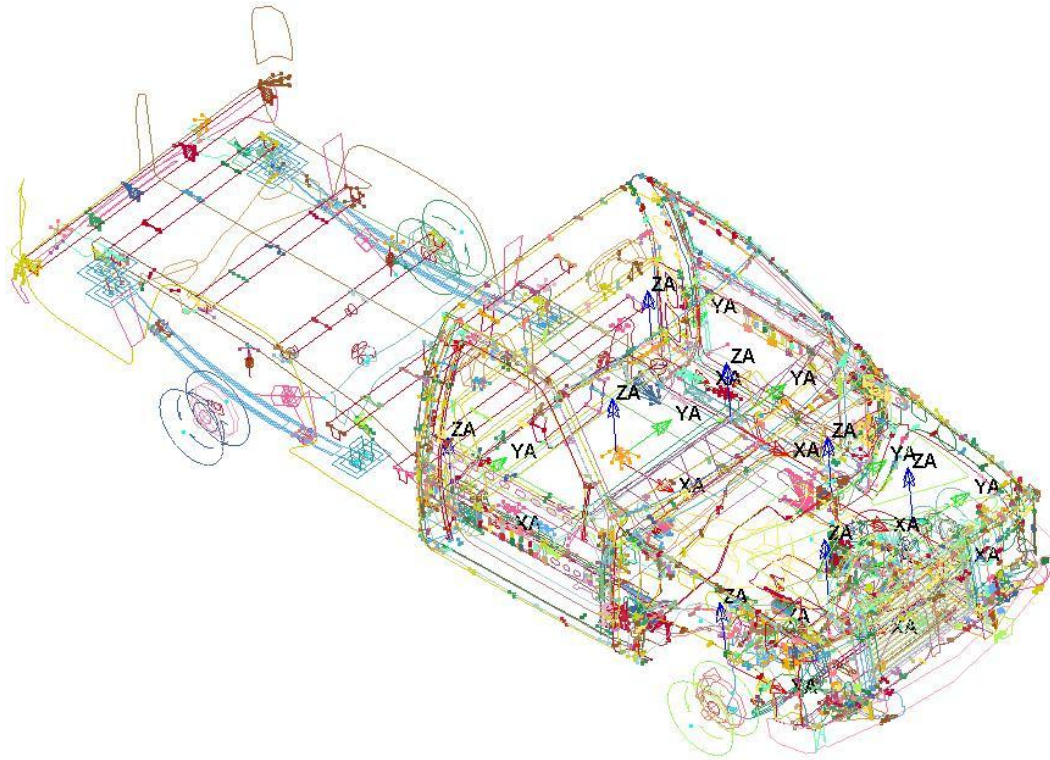


Figura 5-3 Acelerómetros Chevrolet C1500

5.2. VEHÍCULO TIPO TURISMO

El otro vehículo empleado en este proyecto para la simulación de las pruebas de impacto es un Dodge Neon del año 1996 elaborado por NCAC. Se encuentra disponible en la página web de NCAC accesible al público. En la Figura 5-4 se puede ver el modelo empleado [18].

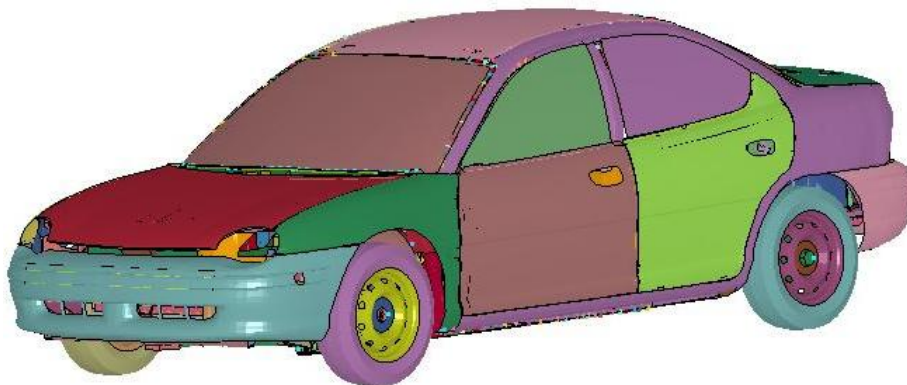


Figura 5-4 Dodge Neon LS-DYNA

Como se indicó anteriormente, es un modelo de elementos finitos, que está formado por 336 partes y 283.859 nodos. Estos datos reflejan el intento de aproximar lo máximo posible el modelo simulado al modelo real.

Aunque en este proyecto no es el objetivo analizar el diseño del vehículo, se va a describir características básicas relativas tanto a la geometría como a los materiales empleados.

5.2.1.GEOMETRÍA

La mayor parte del vehículo está modelado con elementos tipo SHELL, en concreto 267.786 elementos. La estructura se puede ver en la Figura 5-5.



Figura 5-5 Estructura Dodge Neon LS-DYNA

En la Tabla 5-6 se muestran los datos principales del vehículo que son utilizados posteriormente.

| | Dodge Neon Sedan |
|------------------------------|-------------------------|
| Medida Neumático | P185/65 R15 |
| Masa | 1333 Kg |
| Distribución peso (del/tras) | 64.5% / 35.5% |
| Batalla | 2648 mm |

Tabla 5-6 Datos del vehículo tipo turismo



5.2.2. MATERIALES

La mayor parte de las piezas del vehículo empleado en la simulación están constituidas por materiales del tipo `PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY`, es decir, materiales elasto-plástico cuyo comportamiento ya se explicó en el apartado 5.1.2.

Están definidos con este tipo de material componentes estructurales longitudinales y transversales, parachoques delantero y trasero, toda la carrocería del vehículo, algunas piezas del motor y las llantas. Los parámetros de este material se pueden observar en la Tabla 5-7.

| | |
|----------------------------|-------------------------------|
| Densidad ρ | 7.890e-009 Kg/mm ³ |
| Módulo de Young E | 2.100e+005 MPa |
| Coeficiente de Poisson | 0.3000000 |
| Límite elástico σ_y | 250 MPa |
| Densidad ρ | 7.890e-009 Kg/mm ³ |
| Módulo de Young E | 2.100e+005 MPa |
| Coeficiente de Poisson | 0.3000000 |
| Límite elástico σ_y | 370 MPa |
| Densidad ρ | 7.890e-009 Kg/mm ³ |
| Módulo de Young E | 2.100e+005 MPa |
| Coeficiente de Poisson | 0.3000000 |
| Límite elástico σ_y | 600 MPa |

Tabla 5-7 Piecewise Linear Plasticity Dodge



Otro tipo de material definido y empleado en menor proporción es el tipo RIGID. Este tipo de material considera al cuerpo como sólido rígido. Las partes del vehículo que se han definido con este tipo de material son: frenos y algunas piezas del motor.

| | |
|-------------------------|-------------------------------|
| Densidad ρ | 7.890e-010 Kg/mm ³ |
| Módulo de Young E | 2.000e+005 MPa |
| Coefficiente de Poisson | 0.3 |
| Densidad ρ | 7.890e-009 Kg/mm ³ |
| Módulo de Young E | 2.100e+005 MPa |
| Coefficiente de Poisson | 0.3 |

Tabla 5-8 Rigid Dodge

Además de los materiales indicados anteriormente, también se han definido otro tipo de materiales que se han utilizado en otras piezas del coche. Debido a que se emplean en muy pocas piezas, simplemente se van a enunciar: BLATZ-KO_RUBBER, CRUSHABLE_FOAM, DUMPER_VISCOUS, ELASTIC, HONEYCOMB, NULL, SPRING_ELASTIC y SPOTWELD.

5.2.3.VELOCIDAD INICIAL

Para dotar al vehículo de una velocidad inicial en las cuatro simulaciones que se van a realizar en este proyecto con el Dodge Neon, choque contra barrera metálica (frontal y lateral) y choque contra barrera de hormigón (frontal y lateral), se emplea la función de LS-PREPOST *INITIAL_VELOCITY_GENERATION.

La velocidad inicial que se le va a dar al vehículo es de 64 km/h, en los impactos frontales, y 50 km/h, en los impactos laterales. El motivo de haber seleccionado estas velocidades se indicó en el apartado 5.1.3.

La orientación de los ejes, en ambas simulaciones de impacto frontal, es que se hace coincidir el eje X con el eje longitudinal del vehículo, siendo éste el sentido de avance del vehículo. Con esta situación, el eje Y es el eje de rotación de las ruedas. Con esta condición inicial, se procede a introducir la velocidad en el vehículo como se indica a continuación:

- Velocidad lineal de avance del vehículo de 64 km/h:

$$V_x = 1.778 \times 10^4 \text{ mm/s}$$

- Velocidad angular de las ruedas del vehículo, cuyo valor vendrá determinado por el radio nominal de la rueda y la velocidad lineal indicada anteriormente, cumpliendo la expresión mostrada en la ecuación 1.

El radio nominal se obtiene de los datos técnicos de que se han expuesto en la Tabla 5-6. En este caso la medida de las cuatro ruedas es 185/65 R15, el radio nominal se obtiene mediante la siguiente expresión mostrada en la ecuación 2. En este caso queda:

$$r_n = \frac{15}{2} \times 25.4 + \frac{65}{100} \times 185 = 310.75 \text{ mm}$$

Por lo tanto con la ecuación 1 se obtiene finalmente la velocidad angular:

$$\omega_y = 59.3 \text{ rad/s}$$



- Finalmente, en la Tabla 5-9 se indican las coordenadas de los centros de rotación de los ejes.

| | XC mm | ZC mm |
|---------------|-------|-------|
| Eje delantero | 3683 | 296 |
| Eje Trasero | 1040 | 300 |

Tabla 5-9 Centros de rotación neumáticos Dodge

La orientación de los ejes, en ambas simulaciones de impacto lateral, es que se hace coincidir el eje longitudinal del vehículo con el eje X. Con esta situación el eje Y, es el sentido de avance del vehículo y el eje de rotación de las ruedas. Con esta condición inicial, se procede a introducir la velocidad en el vehículo como se indica a continuación:

- Velocidad lineal de avance del vehículo de 50 km/h:

$$V_y = 1.389 \times 10^4 \text{ mm/s}$$

- Se ha dotado al vehículo de velocidad angular en las ruedas, aunque no tiene influencia sobre el resultado final. Las coordenadas de los centros de rotación de los ejes son los mismo que se mostraron en la Tabla 5-9.

5.2.4.GRAVEDAD

Como en el caso anterior, se ha caracterizado el efecto de la gravedad en el problema imponiéndole una aceleración en dirección vertical y sentido hacia abajo a todos los nodos del vehículo con el valor constante de $9.8 \times 10^3 \text{ mm/s}^2$.



5.2.5.ACELERÓMETROS

En el vehículo tipo turismo que se ha utilizado en este proyecto tiene un total de siete acelerómetros y están ubicados en diferentes zonas como se puede ver en la Figura 5-6.

Para facilitar su situación, se indica las posiciones en las que se encuentran en el coche:

- Asiento izquierdo.
- Asiento derecho.
- Parte superior del motor.
- Parte inferior del motor.
- Pinza de freno delantero derecho.
- Pinza de freno delantero izquierdo.
- Centro de gravedad del vehículo.

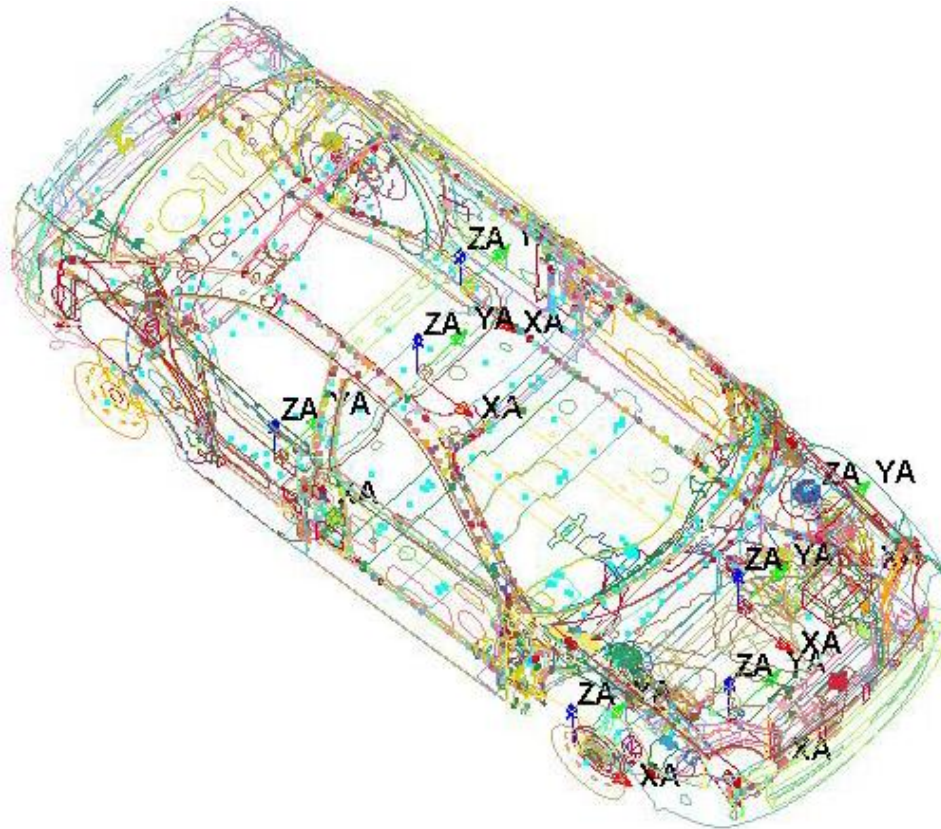


Figura 5-6 Acelerómetros Dodge Neon

5.3. BARRERAS DE SEGURIDAD

Las barreras de seguridad son sistemas de contención que, instaladas en los márgenes o mediana de las carreteras, tienen por objeto reducir la gravedad de los accidentes originados por vehículos que pierden el control y abandonan la calzada. Estas barreras se clasifican según su material en [19]:

- Barrera metálica, Figura 5-7, está formada por: baranda de contención (elemento longitudinal que tiene la misión de reconducir al vehículo y absorber de manera controlada parte de la energía cinética del impacto), poste de sujeción (soporte de la baranda) y separadores (elemento de unión entre baranda y poste de sujeción).



Figura 5-7 Barrera metálica

- Barrera de hormigón: empleada frecuentemente en la mediana de las autopistas y autovías. Esta barrera está formada por una serie de piezas prismáticas de hormigón, como se puede observar en la Figura 5-8.



Figura 5-8 Barrera de hormigón

5.3.1.BARRERA METÁLICA

La barrera metálica es un elemento de la seguridad vial empleado en la mayoría de las carreteras de España y del resto del mundo. Comúnmente conocidos como guardarraíles, están formados por materiales deformables (aceros) que absorben la energía cinética del impacto como se expuso anteriormente.

El modelo de barrera metálica empleada en este proyecto ha sido realizado por NCAC y se encuentra publicado en su web accesible a todo el público. En concreto el modelo utilizado se denomina W-Beam Guardrail y se puede ver en la Figura 5-9. Es un modelo de elementos finitos compuesto por 217 partes y 126.141 nodos que cuenta con todos los componentes de un guardarraíl de una carretera real: barandas de contención, postes de sujeción y separadores [18].

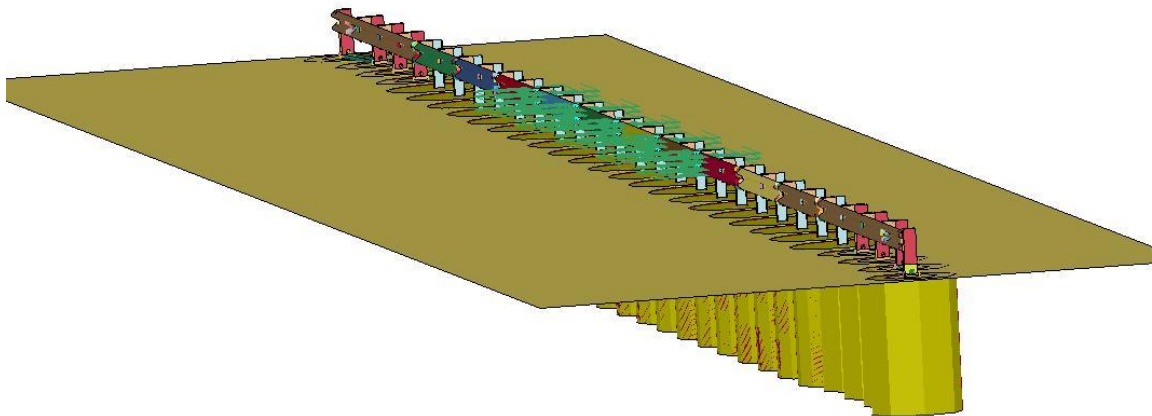


Figura 5-9 Barrera metálica LS-DYNA

5.3.1.1. GEOMETRÍA

La barrera metálica de seguridad, W-Beam Guardrail, está formada principalmente por elementos tipo SHELL, excepto los separadores de madera que son tipo SOLID.

El guardarraíl está compuesto por 29 postes y 12 barandas. Cada poste tiene una longitud total de 1.836 mm, de los cuales 1.107 mm están empotrados en el suelo. Las barandas tienen una longitud de 4.130 mm. Todo el conjunto está anclado en sus dos extremos por un cable.



Los separadores de madera que unen el poste con la baranda tienen unas medidas de 150 mm x 360 mm x 210 mm.

5.3.1.2. MATERIALES

El tipo de material con el que se ha definido a todos los postes de sujeción y barandas de seguridad es `PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY`. Por otro lado se ha definido a los separadores con el material tipo `ELASTIC` y por último, el suelo se ha considerado como sólido rígido, por lo tanto, se ha definido con el material tipo `RIGID`. A continuación en la Tabla 5-10 se muestran los parámetros de estos materiales.

| | Densidad kg/mm ³ | Módulo de Elasticidad MPa | Coefficiente de Poisson |
|-------------------|--------------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| Barandas y postes | 7,890e-009 | 2,000e+005 | 0,3 |
| Separadores | 6,000e-010 | 1,250e+004 | 0,3 |
| Suelo | 1,700e-009 | 2,000e+005 | 0,3 |

Tabla 5-10 Parámetros de los materiales de W-Beam Guardrail

5.3.2. BARRERA DE HORMIGÓN

La barrera de hormigón es un elemento de seguridad vial utilizado en la mediana de autovías y autopistas. Es más rígida que una barrera metálica, ya que su capacidad de absorber energía es menor, y por tanto menos franqueable.

En este proyecto, el modelo de barrera de hormigón empleada ha sido desarrollado por NCAC, se encuentra publicado en su web accesible a todo el público. En concreto el modelo utilizado se denomina Portable Concrete Barrier, se puede ver en la Figura 5-10 [18].

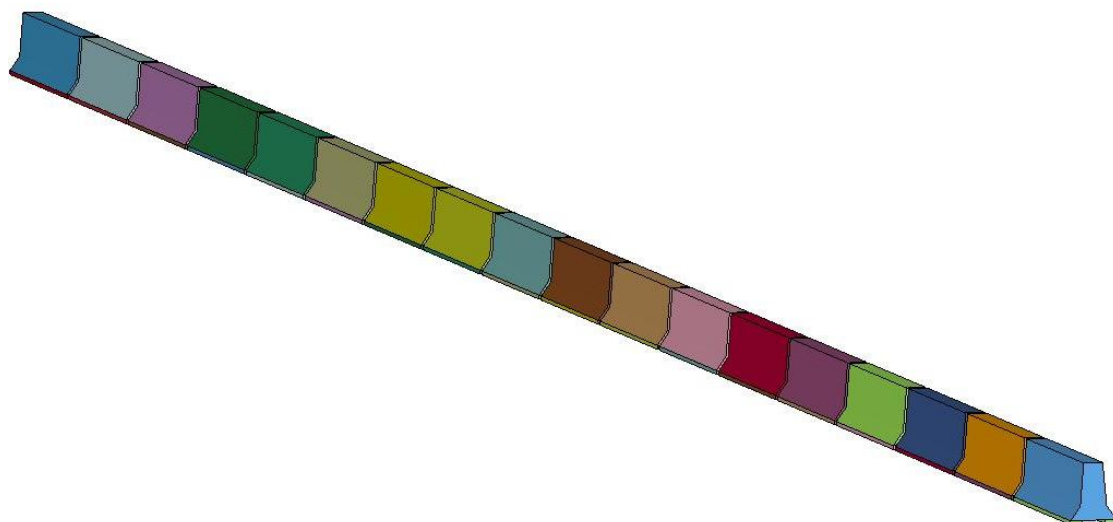


Figura 5-10 Barrera de hormigón LS-DYNA

5.3.2.1. GEOMETRÍA

La barrera de seguridad de hormigón, Portable Concrete Barrier, está formada por 18 bloques de hormigón, todos ellos han sido definidos como elementos tipo SOLID. Cada bloque tiene una longitud de 3.050 mm. Adicionalmente, cada bloque cuenta con un recubrimiento, definido mediante elemento tipo SHELL. En la Figura 5-11 se puede ver el perfil del bloque acotado.

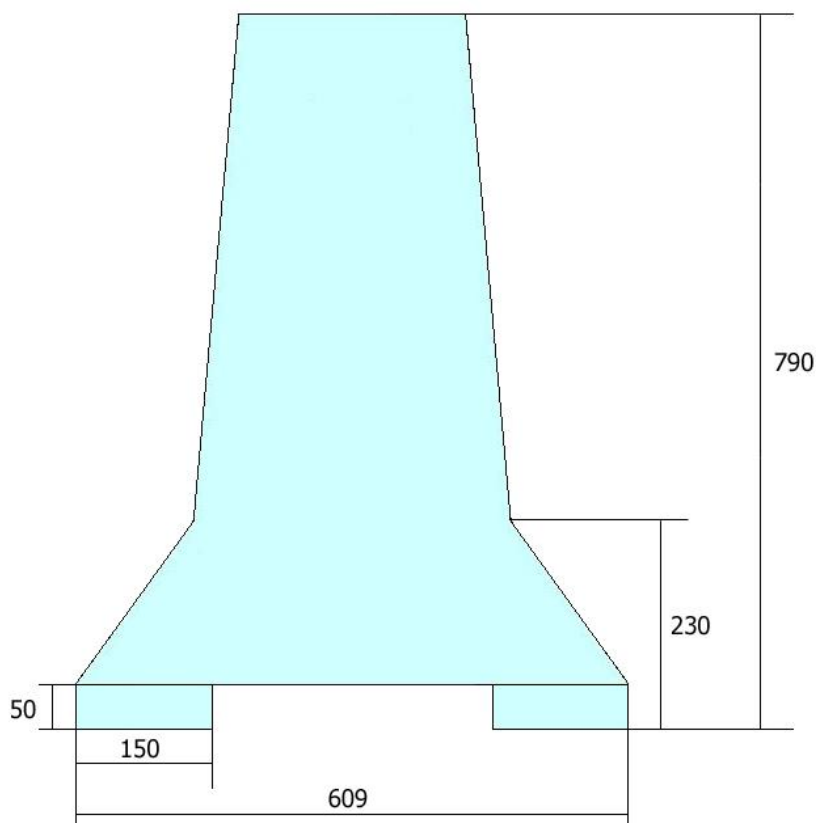


Figura 5-11 Perfil barrera de hormigón acotado en mm

5.3.2.2. MATERIALES

Todos los bloques de hormigón han sido definidos con el tipo de material RIGID, cuyo valor de densidad, módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson se indican en la Tabla 5-11.

| | |
|------------------------|-------------------------------|
| Densidad ρ | 2.400e-009 kg/mm ³ |
| Módulo de Young E | 2.000e+004 MPa |
| Coeficiente de Poisson | 0.28 |

Tabla 5-11 Parámetro del material de Portable Concrete Barrier



5.4. CONTACTOS ENTRE LOS DISTINTOS ELEMENTOS

El tratamiento de impactos entre superficies ha sido siempre una habilidad destacada en el código LS-DYNA. Se han implementado una gran variedad de tipos de contactos, lo que permite una mayor aproximación de una simulación a una situación real. El comando CONTACT permite la interacción entre partes que no están físicamente unidas. Lógicamente, esta herramienta es muy útil e importante en las simulaciones de impacto.

Para los casos simulados en este proyecto se han utilizado dos tipos de contacto para dos regiones de contacto muy diferentes: vehículo-barrera y vehículo-suelo.

5.4.1. CONTACTO VEHÍCULO-BARRERA

En las simulaciones realizadas es necesario definir el contacto entre los vehículos y las barreras de seguridad. Dada la dificultad para saber dónde y cómo se producirá el contacto causado por el impacto entre los dos cuerpos, LS-DYNA ofrece la opción de "*contacto automático*".

En los casos estudiados en este proyecto, no se quiere permitir la penetración entre elementos. Para ello, se ha empleado el contacto tipo CONTACT AUTOMATIC SURFACE TO SURFACE. En la dirección tangencial al plano de contacto, los esfuerzos resultantes son debidos al rozamiento entre las partes implicadas en el impacto. En la dirección normal al plano de contacto se producen las reacciones causadas por la deformación de las superficies impactadas.



5.4.2.CONTACTO VEHÍCULO-SUELO

Para definir el contacto entre el vehículo y el suelo sobre el que se sostiene la barrera, LS-DYNA dispone de una opción para tratar el contacto entre los nodos de un cuerpo deformable (las ruedas del vehículo) y una superficie rígida (el suelo). Además, en este proyecto, se trata al suelo como una superficie plana; por este motivo se emplea una opción más específica de contacto: RIGIDWALL PLANAR. Esta superficie queda definida mediante su vector normal. Las simulaciones se han realizado en condiciones de firme seco, dando al coeficiente de fricción un valor de 0,8.

6. NORMA UNE EN 1317

Las barreras de seguridad instaladas en las autopistas europeas deben cumplir la normativa UNE EN 1317 en referencia a: el nivel de contención ante el impacto de un vehículo, la deceleración que sufren los ocupantes y la deformación de la barrera de seguridad. La normativa establece el criterio que debe cumplir la barrera bajo unas condiciones de impacto [20].

Las barreras de seguridad deben soportar el impacto de distintos tipos de vehículos bajo diferentes condiciones de impacto: velocidad, ángulo de impacto y condiciones del asfalto. En el caso de impacto de vehículos de masa media-baja (turismos), el sistema de retención debe tener la capacidad de deformarse, por lo tanto la mayor parte de la energía cinética es absorbida por la deformación de la barrera y del coche. Ésto reduce significativamente el nivel de desaceleración que sufrirían los ocupantes del vehículo, aumentando su seguridad. Sin embargo, en el caso de vehículos pesados (camiones y autobuses), la barrera debería soportar y redireccionar al vehículo de nuevo a la carretera sin romperse ninguno de sus elementos. Así, el diseño de la barrera de seguridad es un compromiso entre rigidez y fuerza.



Los sistemas de retención deben cumplir las siguientes especificaciones conforme a la normativa UNE EN 1317:

- Nivel de contención: representa la capacidad del sistema para retener al vehículo de forma controlada. Se definen cuatro niveles: bajo, normal, alto y muy alto.
- Severidad de impacto: medida de las consecuencias del impacto sobre los ocupantes. Se emplean tres parámetros: índice de severidad de la aceleración (ASI), velocidad teórica de impacto de la cabeza (THIV) y deceleración de la cabeza después del impacto (PHD).
- Deformación de la barrera: máxima distancia entre la cara del sistema más próxima al tráfico antes del impacto y la posición lateral más desplazada alcanzada por cualquier parte importante del sistema después del impacto. Se han definido 8 niveles que van desde $W1=0,6$ m hasta $W8=3,5$ m.

De los diferentes parámetros enunciados anteriormente, que miden la severidad de un impacto, en este proyecto se va a utilizar el ASI (Acceleration Severity Index). Este índice de severidad no se emplea para medir la seguridad de las barreras, sino para establecer una comparativa, lo más objetiva posible, entre dos vehículos con diferentes alturas del centro de gravedad. De esta forma, se determina qué vehículo protege más a sus ocupantes ante distintas situaciones de impacto contra barreras.

El Índice de Severidad de la Aceleración, es un parámetro adimensional que se obtiene de las deceleraciones sufridas por el vehículo ante un impacto. Se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$ASI(t) = \left[\left(\frac{\bar{a}_x}{\hat{a}_x} \right)^2 + \left(\frac{\bar{a}_y}{\hat{a}_y} \right)^2 + \left(\frac{\bar{a}_z}{\hat{a}_z} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde \bar{a}_x , \bar{a}_y y \bar{a}_z son las aceleraciones medias experimentadas por el vehículo en un intervalo de tiempo de 50 ms desde que se produce el impacto; \hat{a}_x , \hat{a}_y y \hat{a}_z son los valores de aceleración límite correspondientes a los tres ejes. Estos valores son 12g, 9g y 10g para la dirección longitudinal (x), transversal (y) y vertical (z).

La gravedad de las lesiones que sufre una ocupante ante un impacto aumenta con el índice ASI, como se puede ver en la Tabla 6-1. Es decir, un nivel de ASI comprendido entre 0,1 y 1 ocasiona daños al vehículo pero los ocupantes sufren, en el peor de los casos, heridas leves. Cuando el índice ASI está comprendido entre 1 y 1,4 el choque puede ocasionar fracturas y pérdidas de conocimiento de corta duración. Las consecuencias de impacto más peligrosas e incluso letales para los ocupantes se producirán cuando el ASI es aún mayor, hasta un máximo de 1,9.

| Tipo de lesiones | Índice ASI |
|----------------------|------------|
| Leves | ≤ 1 |
| Medias - Graves | $\leq 1,4$ |
| Muy graves - Letales | $\leq 1,9$ |

Tabla 6-1 Índice ASI



Conforme a lo expuesto anteriormente, en los casos en los que el ASI es inferior o igual a 1,4 se puede considerar que las consecuencias de la colisión son leves y, por tanto, se puede certificar el diseño de la barrera de acuerdo con la norma UNE EN 1317. Si, por el contrario, el valor es superior a 1,4; la barrera no cumple con las condiciones de seguridad mínimas y es rechazada.

Por último indicar que, a pesar de utilizar las aceleraciones del vehículo para el cálculo del índice ASI, se considera que el ocupante está en contacto con el vehículo mediante la utilización del cinturón de seguridad. Por tanto, el valor del ASI aporta una medida de la severidad de la colisión que se asume proporcional al riesgo de los ocupantes.

7. RESULTADOS

En una simulación de impacto realizada por ordenador, se recogen gran cantidad de datos, que posteriormente hay que valorar, en función de un criterio que sea lo más objetivo posible. Para ello, en este proyecto se ha empleado la normativa UNE EN 1317, expuesta en el capítulo anterior [20].

Todas las simulaciones se han realizado con el programa LS-DYNA. Esta aplicación genera archivos que contienen información de velocidad, aceleración, temperatura, deformaciones, presión, etc. Posteriormente, el usuario mediante LS-PREPOST, selecciona los datos que son necesarios para su estudio, pudiendo visualizar los resultados obtenidos y trabajar con ellos en un entorno gráfico.

En este capítulo, se muestran los distintos casos estudiados en este proyecto, indicando los resultados, las gráficas y la secuencia de imágenes obtenidos en cada uno de ellos.

7.1. CHOQUE FRONTAL CONTRA BARRERA METÁLICA

La primera parte del proyecto consiste en simular, por separado, el impacto frontal del vehículo tipo todo-terreno y del vehículo tipo turismo contra una barrera de seguridad metálica, en concreto de acero. La velocidad inicial en ambos casos es 64 km/h y los datos requeridos para el análisis se han registrado cada 5 ms. Los resultados obtenidos se muestran en los apartados 7.1.1 y 7.1.2 respectivamente.

7.1.1. VEHÍCULO TIPO TODO-TERRENO

En la Figura 7-1 se puede ver la secuencia de imágenes de esta prueba. Se ha seleccionado un intervalo de tiempo de 60 ms entre cada imagen con el objetivo de mostrar la secuencia real de la simulación. El orden cronológico de las ilustraciones es de izquierda a derecha y de arriba abajo.

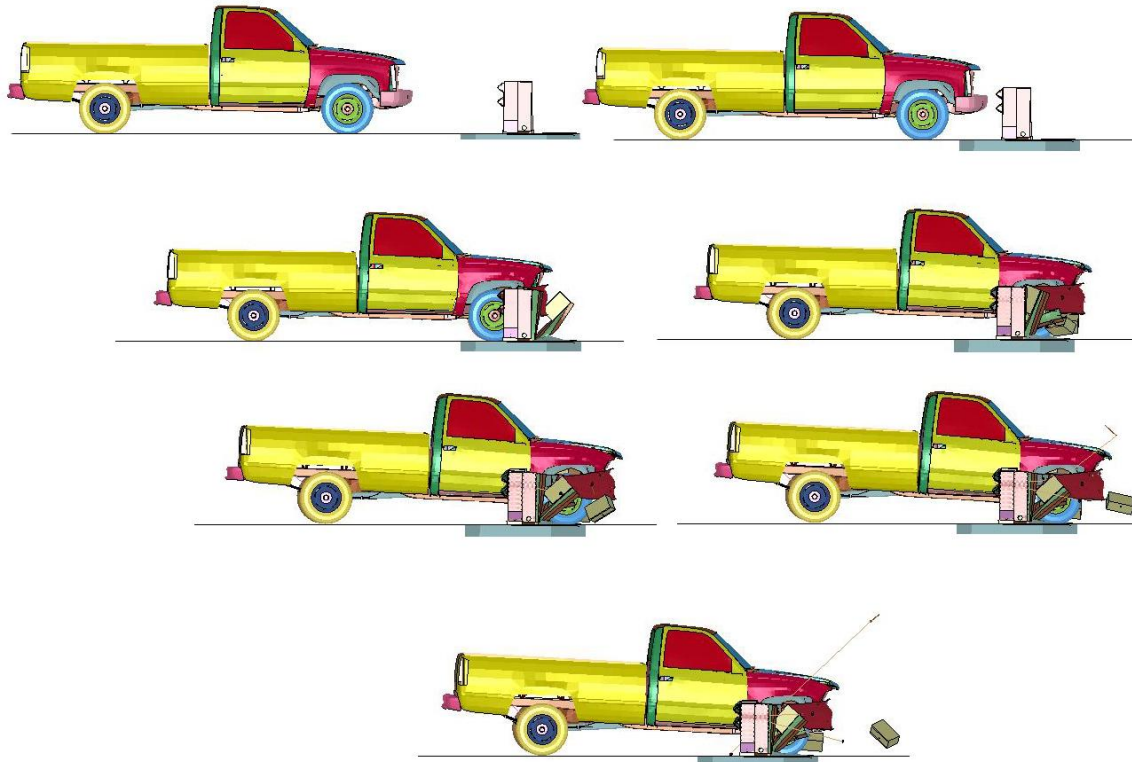


Figura 7-1 Secuencia impacto frontal Chevrolet contra barrera metálica

Los datos necesarios, para el análisis de esta simulación, se han obtenido gracias a un acelerómetro situado en el centro de gravedad del vehículo. Estos datos están referenciados al sistema de coordenadas local del vehículo, dado por el propio acelerómetro, que coincide con el sistema de coordenadas global del modelo. A continuación se muestran los resultados obtenidos aplicando la norma expuesta en el capítulo 6 para el cálculo del índice ASI.

Mediante LS-PREPOST se han obtenido las gráficas de la variación de la velocidad y de la aceleración con el tiempo. En la gráfica de la velocidad, Figura 7-2, se observa como la velocidad empieza a disminuir drásticamente transcurridos 80 ms, instante en el que se produce el contacto entre el coche y la barrera de seguridad.

Para el cálculo del índice ASI se tomarán, conforme viene indicado en la normativa UNE EN 1317 [20], la velocidad del vehículo en ese instante de tiempo ($t=80$ ms) y la velocidad transcurridos 50 ms desde ese momento ($t=130$ ms) para el cálculo de la aceleración media. Este intervalo de tiempo coincide con la máxima variación de la aceleración como se puede ver en la Figura 7-3.

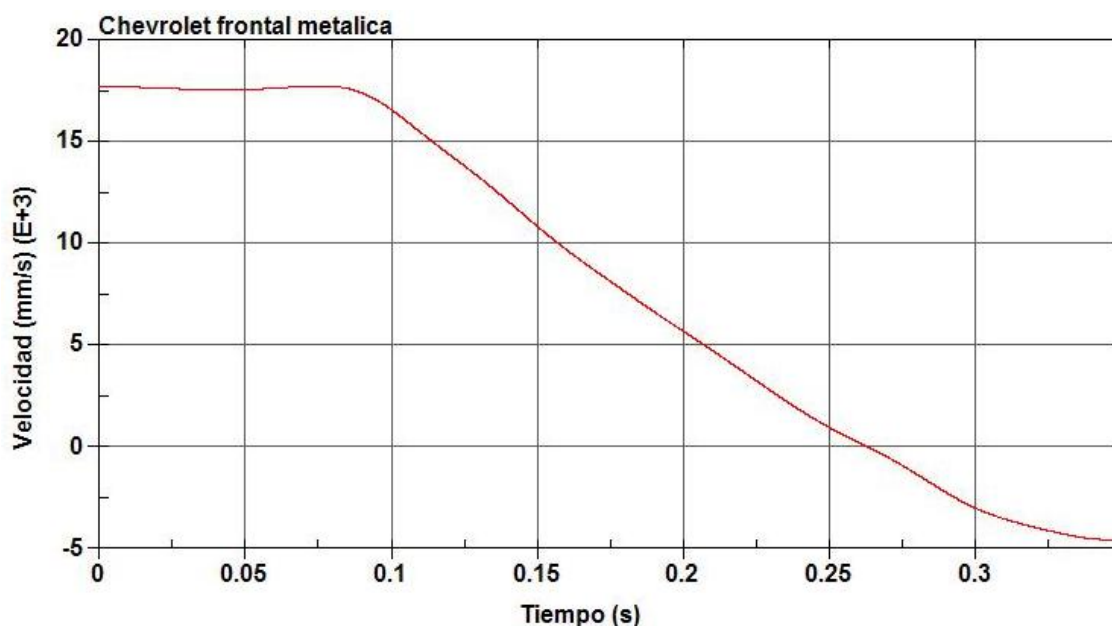


Figura 7-2 Gráfica de la velocidad en dirección X Chevrolet

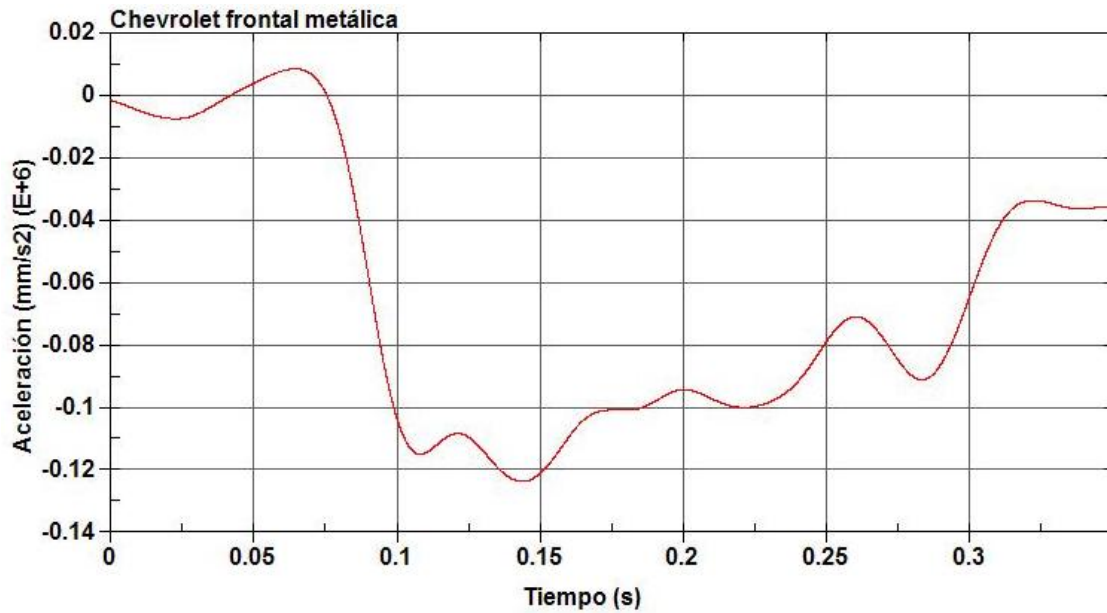


Figura 7-3 Gráfica de la aceleración en dirección X Chevrolet

Para calcular la aceleración media en el intervalo de tiempo indicado anteriormente, se emplea la tabla de datos que proporciona LS-PREPOST a partir de la gráfica de la Figura 7-2. Empleando esos valores y la expresión del movimiento rectilíneo uniformemente acelerado (MRUA), mostrada en la siguiente ecuación, se obtiene la aceleración:

$$V_f = V_0 + a \cdot t \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde: V_f es la velocidad final en m/s.
 V_0 es la velocidad inicial en m/s.
 a es la aceleración media en m/s².
 t es el tiempo transcurrido en s.

Sustituyendo los datos en la ecuación 4, se obtiene:

$$\bar{a}_x = \frac{17.77 - 13.31}{0.05} = 89.2 \text{ m/s}^2 = 9.1g$$

Al tratarse de un impacto completamente frontal, la aceleración transversal (eje Y) y la aceleración vertical (eje Z) son despreciables frente a la aceleración longitudinal (eje X). Para demostrar esta simplificación, en la Figura 7-4 y en la Figura 7-5 se pueden ver las gráficas de la variación de la velocidad con el tiempo, en los ejes Y y Z respectivamente.

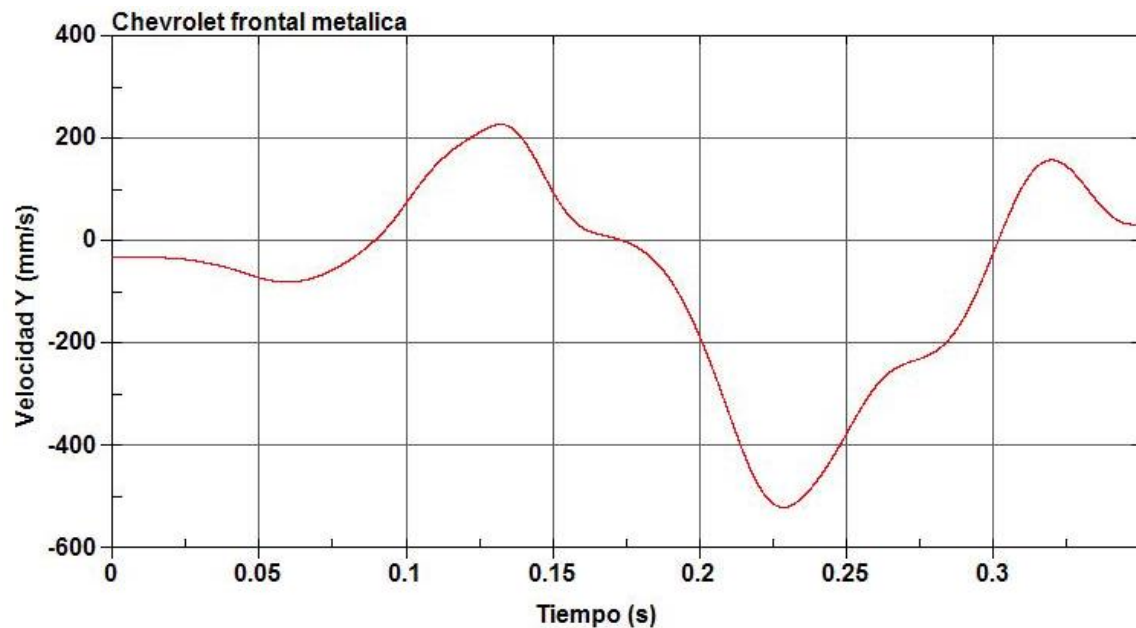


Figura 7-4 Gráfica de la velocidad en dirección Y Chevrolet

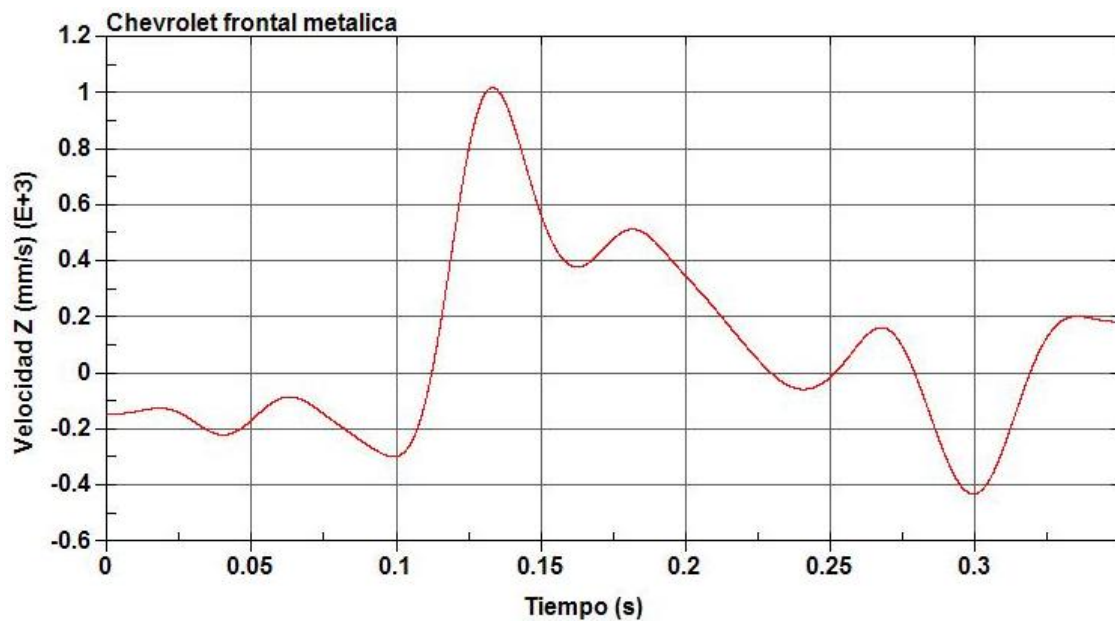


Figura 7-5 Gráfica de la velocidad en dirección Z Chevrolet

Por último en este apartado se calcula el índice ASI con el valor obtenido de la aceleración en la dirección longitudinal X, según se indicó en el capítulo 6, empleando la ecuación 3.

$$ASI(t) = \left[\left(\frac{9.1}{12} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0.76$$

Para este tipo de choque, con un índice ASI=0.76, la norma UNE EN 1317, considera que las lesiones sufridas por los ocupantes serían leves.

7.1.2.VEHÍCULO TIPO TURISMO

En la Figura 7-6 se puede ver la secuencia de imágenes de esta simulación. Se ha seleccionado un intervalo de tiempo de 30 ms entre cada imagen con el objetivo de mostrar la secuencia real de la simulación. El orden cronológico de las ilustraciones es de izquierda a derecha y de arriba abajo.

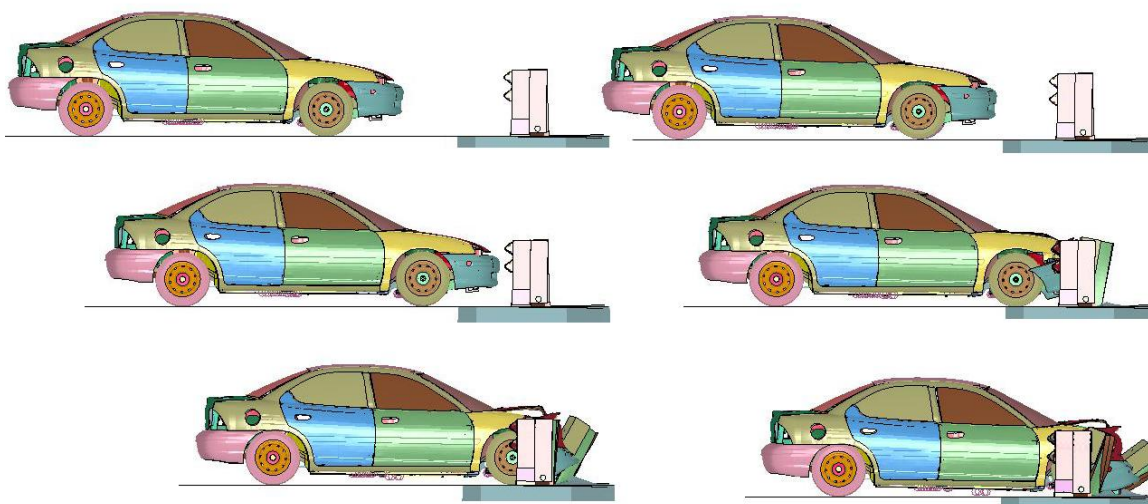


Figura 7-6 Secuencia impacto frontal Neon contra barrera metálica

Los datos necesarios, para el análisis de esta simulación, se han obtenido gracias a un acelerómetro situado en el centro de gravedad del vehículo. Estos datos están referenciados al sistema de coordenadas local del vehículo, dado por el propio acelerómetro, que coincide con el sistema de coordenadas global del modelo. A continuación se muestran los resultados obtenidos aplicando la norma expuesta en el capítulo 6 para el cálculo del índice ASI.

Mediante LS-PREPOST se han obtenido las gráficas de la variación de la velocidad y de la aceleración con el tiempo. En la gráfica de la velocidad, Figura 7-7, se observa como la velocidad empieza a disminuir drásticamente transcurridos 65 ms, instante en el que se produce el contacto entre el coche y la barrera de seguridad.

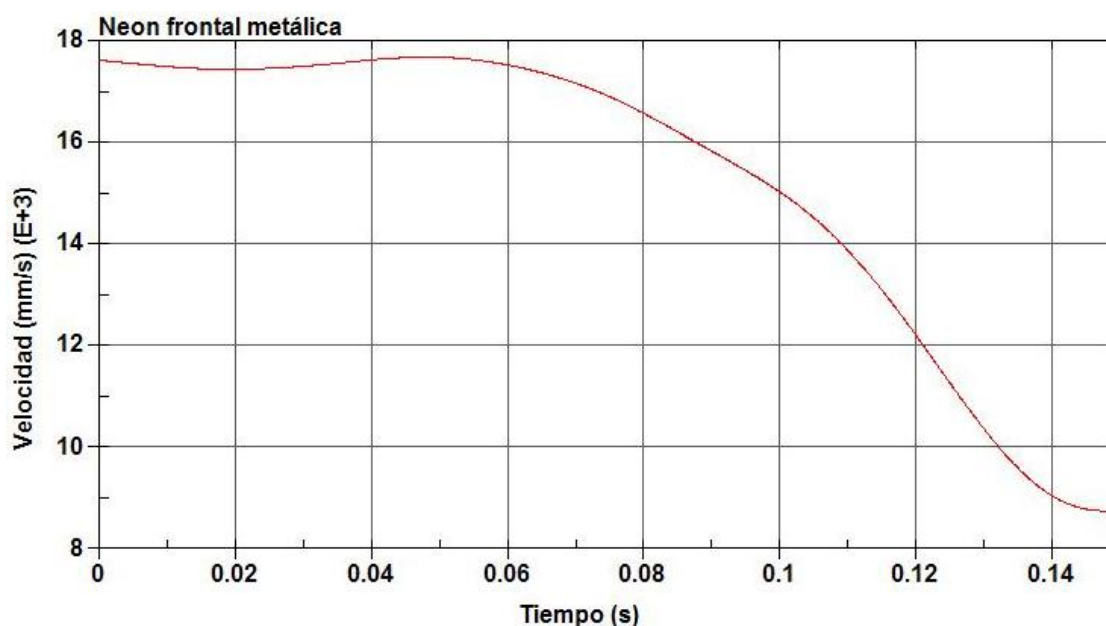


Figura 7-7 Gráfica de la velocidad en dirección X Neon

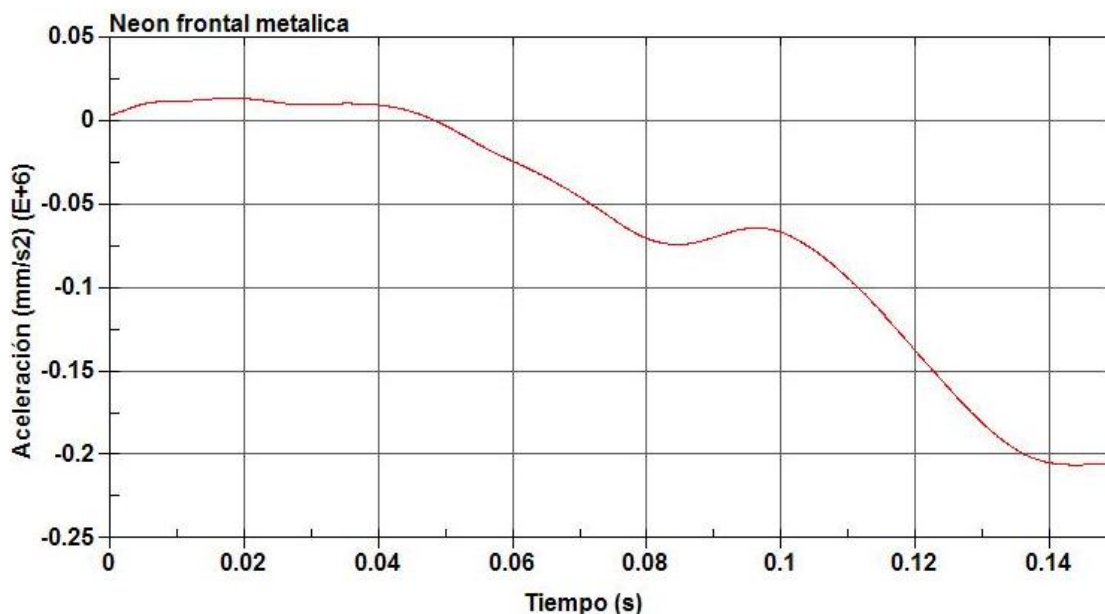


Figura 7-8 Gráfica de la aceleración en dirección X Neon

Para el cálculo del índice ASI se tomarán, conforme viene indicado en la normativa UNE EN 1317 [20], la velocidad del vehículo en ese instante de tiempo ($t=65$ ms) y la velocidad transcurridos 50 ms desde ese momento ($t=115$ ms). Este intervalo de tiempo coincide con la máxima variación de la aceleración como se puede ver en la Figura 7-8.

Para calcular la aceleración media en el intervalo de tiempo indicado anteriormente, se emplea la tabla de datos que proporciona LS-PREPOST a partir de la gráfica de la Figura 7-7. Empleando esos valores y la ecuación del movimiento rectilíneo uniformemente acelerado (MRUA), mostrada en la ecuación 4, se obtiene la aceleración. Sustituyendo los datos en la ecuación 4, se obtiene:

$$\bar{a}_x = \frac{17.4 - 13.12}{0.05} = 85.6 \text{ m/s}^2 = 8.73g$$

Como se indicó en el apartado 7.1.1, al tratarse de un impacto completamente frontal, la aceleración transversal (eje Y) y la aceleración vertical (eje Z) son despreciables frente a la aceleración longitudinal (eje X).

Por último en este apartado se calcula el índice ASI con el valor obtenido de la aceleración en la dirección longitudinal X, según se indicó en el capítulo 6, empleando la ecuación 3.

$$ASI(t) = \left[\left(\frac{8.73}{12} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0.73$$

Para este tipo de choque, con un índice ASI=0.73, la norma UNE EN 1317, considera que las lesiones sufridas por los ocupantes serían leves.

7.2. CHOQUE LATERAL CONTRA BARRERA METÁLICA

En la segunda parte del proyecto, se simula, por separado, el impacto lateral del vehículo tipo todo-terreno y del vehículo tipo turismo contra la misma barrera empleada en el apartado 7.1. La velocidad inicial en ambos casos de impacto lateral es de 50 km/h, y los datos requeridos para el análisis se han registrado cada 5 ms. Las simulaciones se han efectuado con el código LS-DYNA versión 970. Los resultados obtenidos se muestran en los apartados 7.2.1 y 7.2.2.

7.2.1. VEHÍCULO TIPO TODO-TERRENO

En la Figura 7-9 se puede ver la secuencia de imágenes de esta prueba. Se ha seleccionado un intervalo de tiempo de 60 ms entre cada imagen con el objetivo de mostrar la secuencia real de la simulación. El orden cronológico de las ilustraciones es de izquierda a derecha y de arriba abajo.

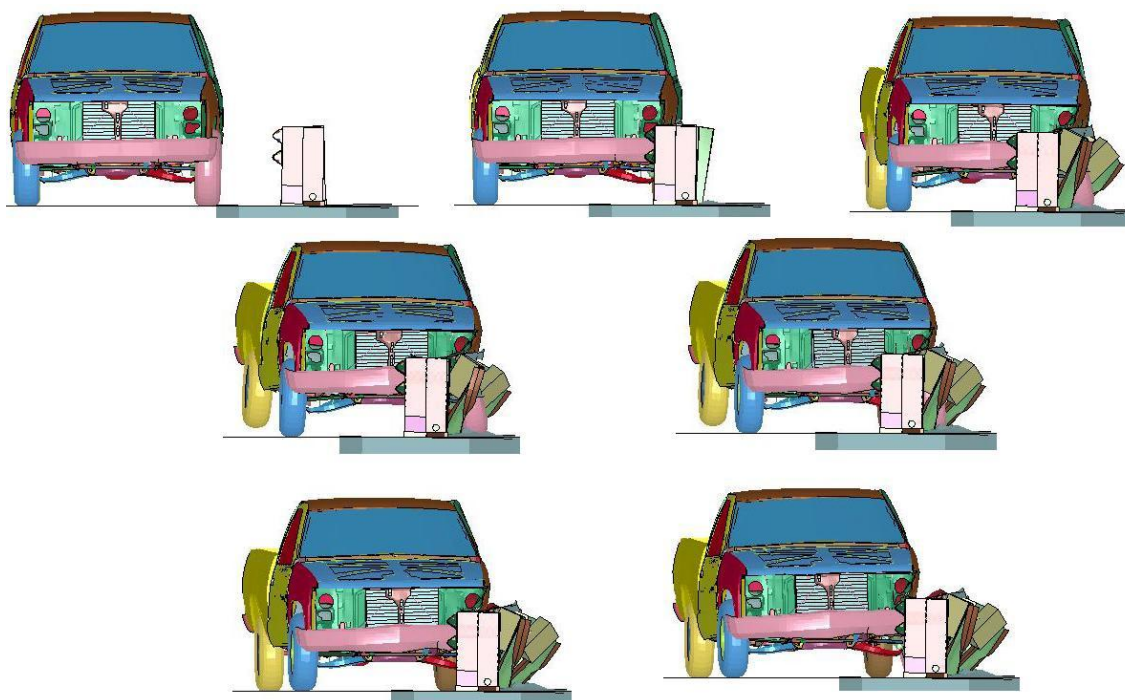


Figura 7-9 Secuencia impacto lateral Chevrolet contra barrera metálica

Los datos necesarios, para el análisis de esta simulación, se han obtenido gracias a un acelerómetro situado en el centro de gravedad del vehículo. Estos datos están referenciados al sistema de coordenadas local del vehículo, dado por el propio acelerómetro, que coincide con el sistema de coordenadas global del modelo. A continuación se muestran los resultados obtenidos aplicando la norma expuesta en el capítulo 6 para el cálculo del índice ASI.

Mediante LS-PREPOST se han obtenido las gráficas de la variación de la velocidad y de la aceleración con el tiempo. En la gráfica de la velocidad, Figura 7-10, se observa como la velocidad empieza a disminuir drásticamente transcurridos 30 ms, instante en el que se produce el contacto entre el coche y la barrera de seguridad.

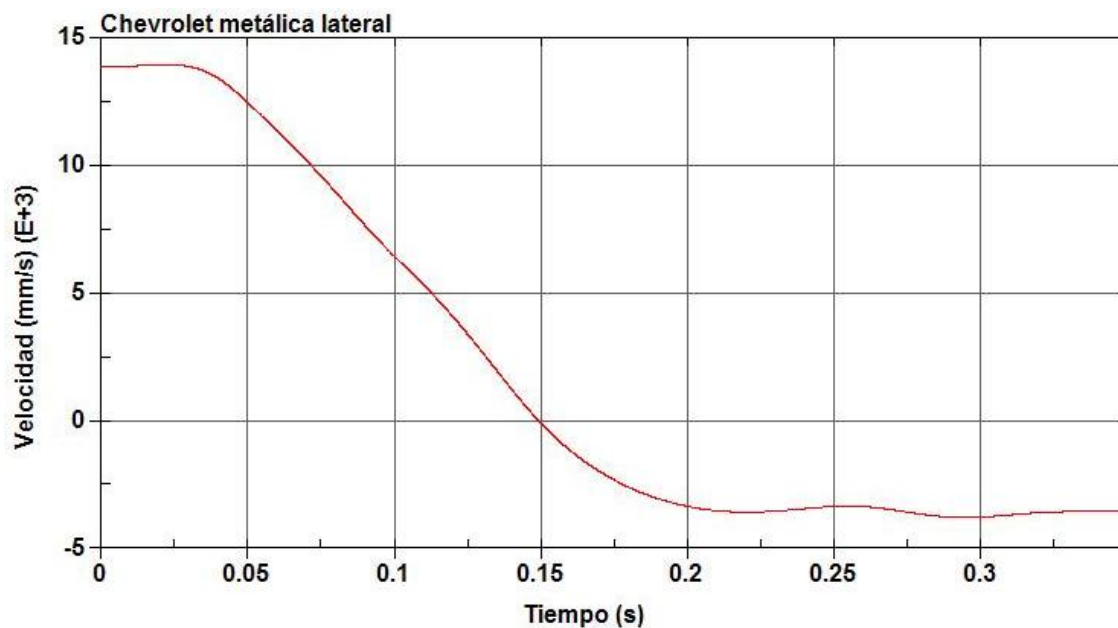


Figura 7-10 Gráfica de la velocidad en dirección Y Chevrolet

Para el cálculo del índice ASI se tomarán, conforme viene indicado en la normativa UNE EN 1317 [20], la velocidad del vehículo en ese instante de tiempo ($t=30$ ms) y la velocidad transcurridos 50 ms desde ese momento ($t=80$ ms). Este intervalo de tiempo coincide con la máxima variación de la aceleración como se puede ver en la Figura 7-11.

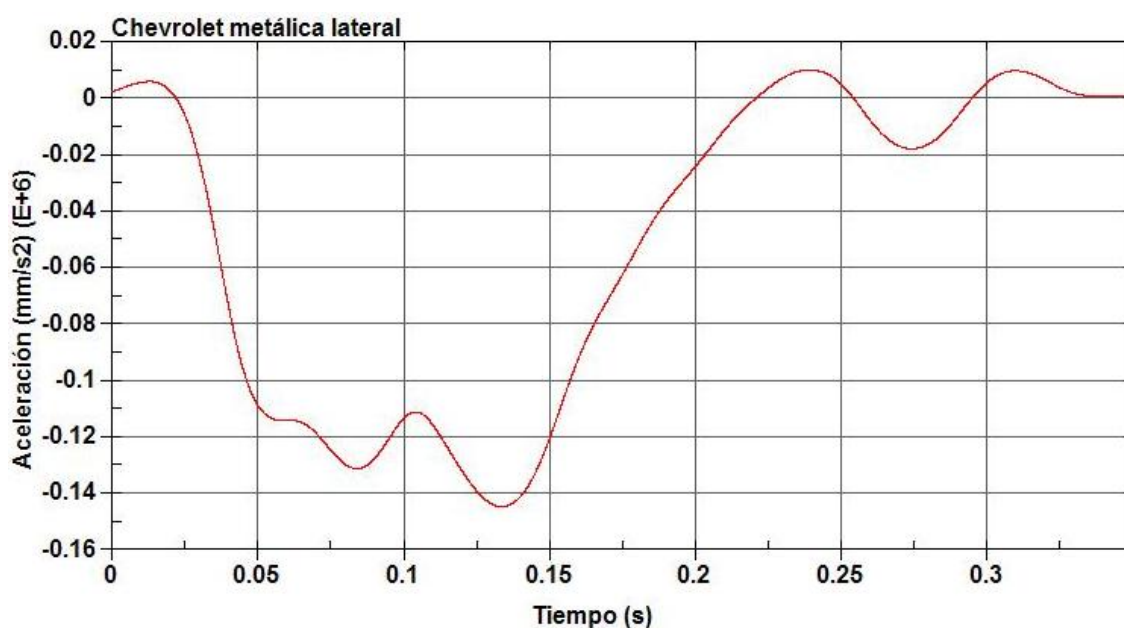


Figura 7-11 Gráfica de la aceleración en dirección Y Chevrolet

Para calcular la aceleración media en el intervalo de tiempo indicado anteriormente, se emplea la tabla de datos que proporciona LS-PREPOST a partir de la gráfica de la Figura 7-10. Empleando esos valores y la ecuación del movimiento rectilíneo uniformemente acelerado (MRUA), mostrada en la ecuación 4, se obtiene la aceleración. Sustituyendo los datos en la ecuación 4, se obtiene:

$$\bar{a}_y = \frac{13.92 - 9.01}{0.05} = 98.2 \text{ m/s}^2 = 10.01g$$

Al tratarse de un impacto completamente lateral, la aceleración longitudinal (eje X) y la aceleración vertical (eje Z) son despreciables frente a la aceleración transversal (eje Y).

Por último en este apartado se calcula el índice ASI con el valor obtenido de la aceleración en la dirección longitudinal Y, según se indicó en el capítulo 6 empleando la ecuación 3.

$$ASI(t) = \left[\left(\frac{10.01}{9} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 1.11$$

Para este tipo de choque, con un índice ASI=1.11, la norma UNE EN 1317, considera que las lesiones sufridas por los ocupantes serían medias-graves.

7.2.2.VEHÍCULO TIPO TURISMO

En la Figura 7-12 se puede ver la secuencia de imágenes de esta prueba. Se ha seleccionado un intervalo de tiempo de 30 ms entre cada imagen con el objetivo de mostrar la secuencia real de la simulación. El orden cronológico de las ilustraciones es de izquierda a derecha y de arriba abajo.

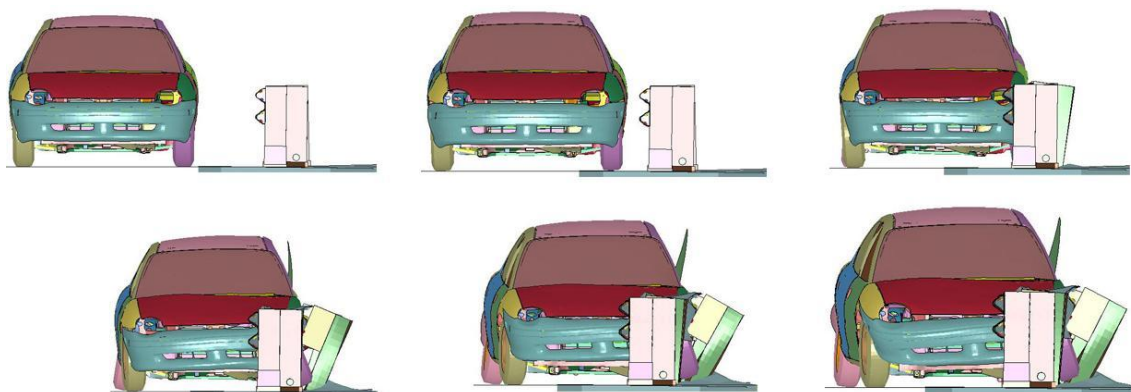


Figura 7-12 Secuencia impacto lateral Neon contra barrera metálica

Los datos necesarios, para el análisis de esta simulación, se han obtenido gracias a un acelerómetro situado en el centro de gravedad del vehículo. Estos datos están referenciados al sistema de coordenadas local del vehículo, dado por el propio acelerómetro, que coincide con el sistema de coordenadas global del modelo. A continuación se muestran los resultados obtenidos aplicando la norma expuesta en el capítulo 6 para el cálculo del índice ASI.

Mediante LS-PREPOST se han obtenido las gráficas de la variación de la velocidad y de la aceleración con el tiempo. En la gráfica de la velocidad, Figura 7-13, se observa como la velocidad empieza a disminuir drásticamente transcurridos 35 ms, instante en el que se produce el contacto entre el coche y la barrera de seguridad.

Para el cálculo del índice ASI se tomarán, conforme viene indicado en la normativa UNE EN 1317 [20], la velocidad del vehículo en ese instante de tiempo ($t=35$ ms) y la velocidad transcurridos 50 ms desde ese momento ($t=85$ ms). Este intervalo de tiempo coincide con la máxima variación de la aceleración como se puede ver en la Figura 7-14.

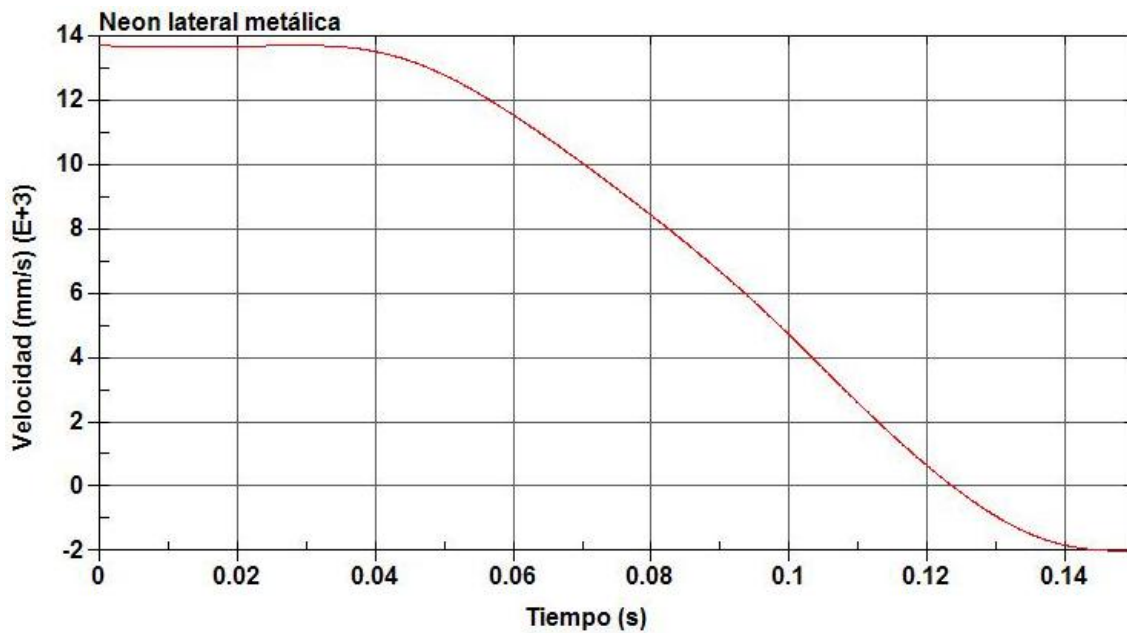


Figura 7-13 Gráfica de la velocidad en dirección Y Neon

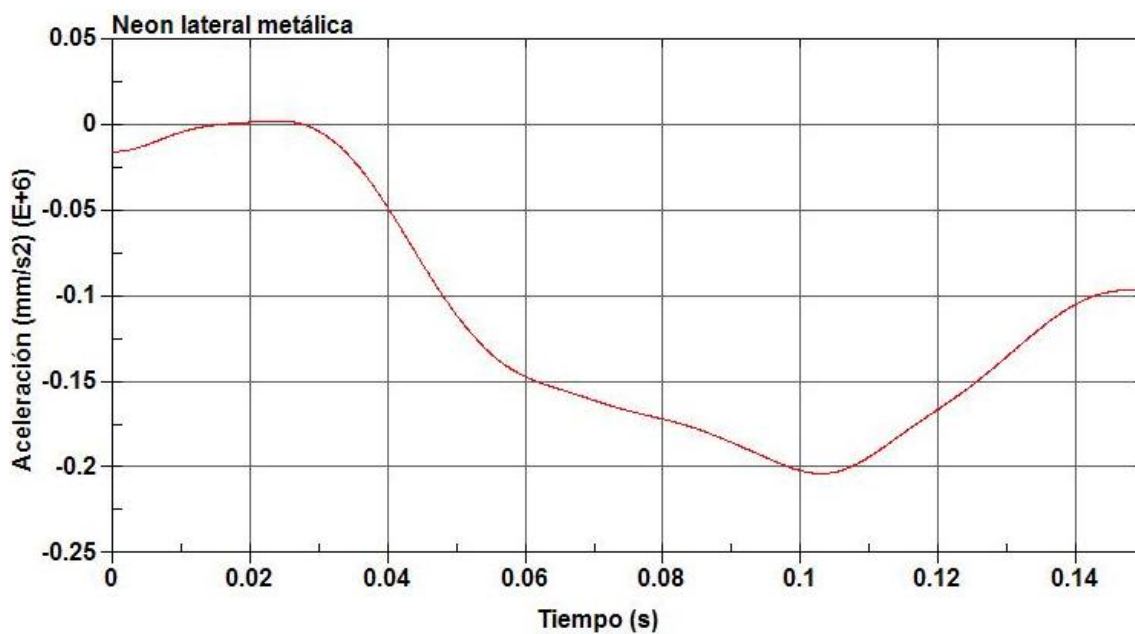


Figura 7-14 Gráfica de la aceleración en dirección Y Neon

Para calcular la aceleración media en el intervalo de tiempo indicado anteriormente, se emplea la tabla de datos que proporciona LS-PREPOST a partir de la gráfica de la Figura 7-13. Empleando esos valores y la ecuación del movimiento rectilíneo uniformemente acelerado (MRUA), mostrada en la ecuación 4, se obtiene la aceleración.

Sustituyendo los datos en la ecuación 4, se obtiene:

$$\bar{a}_y = \frac{13.7 - 7.62}{0.05} = 121.6 \text{ m/s}^2 = 12.39g$$

Al tratarse de un impacto completamente lateral, la aceleración longitudinal (eje X) y la aceleración vertical (eje Z) son despreciables frente a la aceleración transversal (eje Y).

Por último en este apartado se calcula el índice ASI con el valor obtenido de la aceleración en la dirección longitudinal Y, según se indicó en el capítulo 6 empleando la ecuación 3.

$$ASI(t) = \left[\left(\frac{12.39}{9} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 1.37$$

Para este tipo de choque, con un índice ASI=1.37, la norma UNE EN 1317, considera que las lesiones sufridas por los ocupantes serían medias-graves.

7.3. CHOQUE FRONTAL CONTRA BARRERA DE HORMIGÓN

La tercera parte del proyecto consiste en simular, por separado, el impacto frontal del vehículo tipo todo-terreno y del vehículo tipo turismo contra una barrera de seguridad de hormigón. La velocidad inicial en ambos casos es 64 km/h y los datos requeridos para el análisis se han registrado cada 5 ms. Los resultados obtenidos se muestran en los apartados 7.3.1 y 7.3.2.

7.3.1. VEHÍCULO TIPO TODO-TERRENO

En la Figura 7-15 se puede ver la secuencia de imágenes de esta prueba. Se ha seleccionado un intervalo de tiempo de 100 ms entre cada imagen con el objetivo de mostrar la secuencia real de la simulación. El orden cronológico de las ilustraciones es de izquierda a derecha y de arriba abajo.

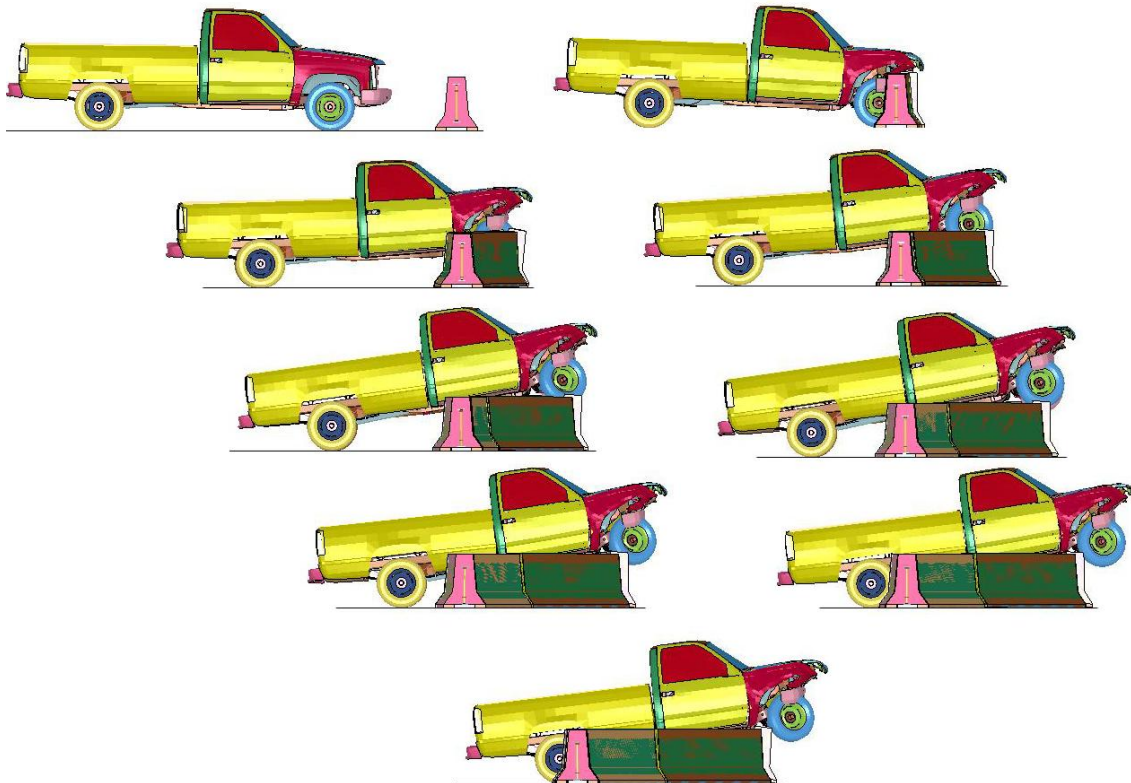


Figura 7-15 Secuencia impacto frontal Chevrolet contra barrera de hormigón

Los datos necesarios, para el análisis de esta simulación, se han obtenido gracias a un acelerómetro situado en el centro de gravedad del vehículo. Estos datos están referenciados al sistema de coordenadas local del vehículo, dado por el propio acelerómetro, que coincide con el sistema de coordenadas global del modelo. A continuación se muestran los resultados obtenidos aplicando la norma expuesta en el capítulo 6 para el cálculo del índice ASI.

Mediante LS-PREPOST se han obtenido las gráficas de la variación de la velocidad y de la aceleración con el tiempo. En la gráfica de la velocidad, Figura 7-16, se observa como la velocidad empieza a disminuir drásticamente transcurridos 48 ms, instante en el que se produce el contacto entre el coche y la barrera de seguridad.

Para el cálculo del índice ASI se tomarán, conforme viene indicado en la normativa UNE EN 1317 [20], la velocidad del vehículo en ese instante de tiempo ($t=48$ ms) y la velocidad transcurridos 50 ms desde ese momento ($t=98$ ms). Este intervalo de tiempo coincide con la máxima variación de la aceleración como se puede ver en la Figura 7-17.

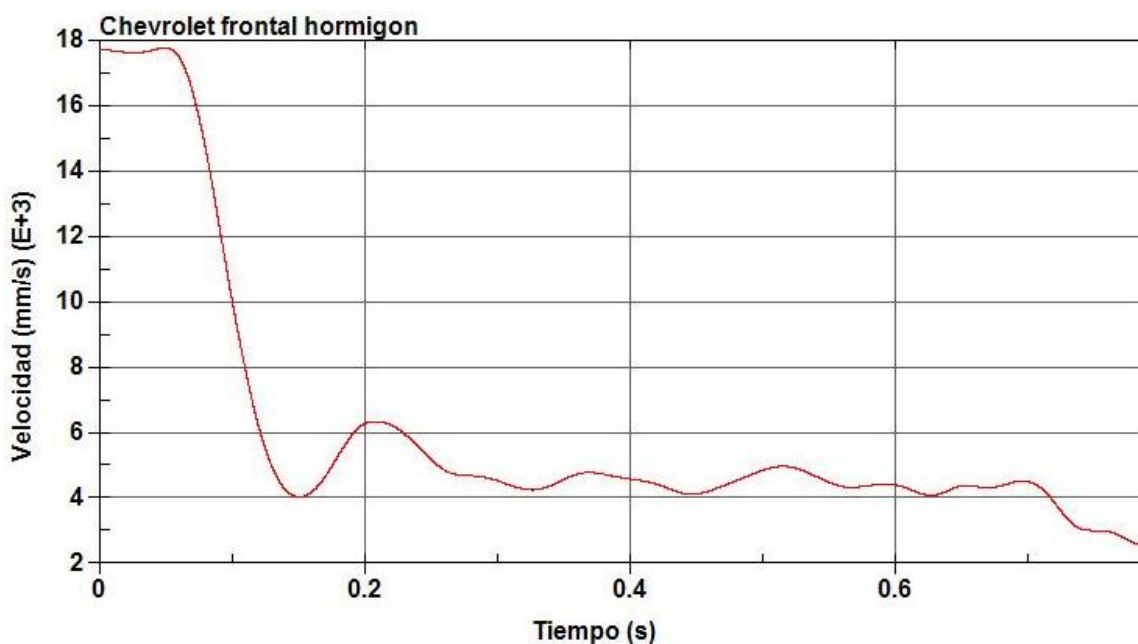


Figura 7-16 Gráfica de la velocidad en dirección X Chevrolet

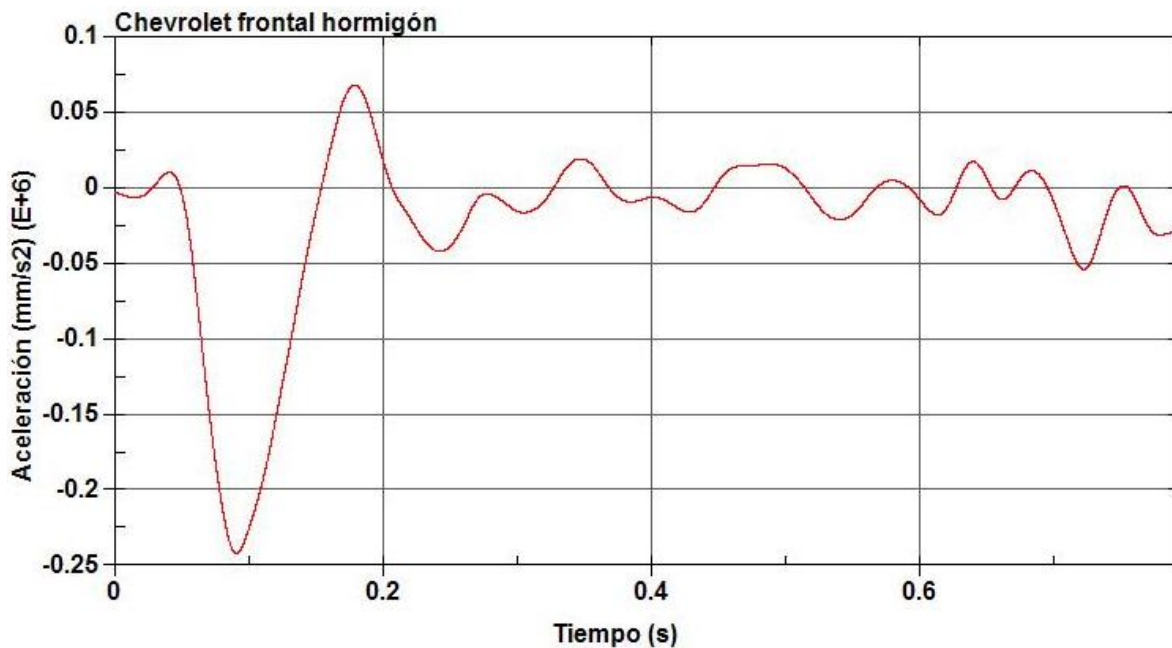


Figura 7-17 Gráfica de la aceleración en dirección X Chevrolet

Para calcular la aceleración media en el intervalo de tiempo indicado anteriormente, se emplea la tabla de datos que proporciona LS-PREPOST a partir de la gráfica de la Figura 7-16. Empleando esos valores y la ecuación del movimiento rectilíneo uniformemente acelerado (MRUA), mostrada en la ecuación 4, se obtiene la aceleración. Sustituyendo los datos en la ecuación 4, se obtiene:

$$\bar{a}_x = \frac{17.82 - 10.48}{0.05} = 146.8 \text{ m/s}^2 = 14.96g$$

Como se indicó en apartados anteriores, al tratarse de un impacto completamente frontal, la aceleración transversal (eje Y) y la aceleración vertical (eje Z) son despreciables frente a la aceleración longitudinal (eje X).

Por último en este apartado se calcula el índice ASI con el valor obtenido de la aceleración en la dirección longitudinal X, según se indicó en el capítulo 6 empleando la ecuación 3.

$$ASI(t) = \left[\left(\frac{14.96}{12} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 1.25$$

Para este tipo de choque, con un índice ASI=1.25, la norma UNE EN 1317, considera que las lesiones sufridas por los ocupantes serían de tipo medio-graves.

7.3.2. VEHÍCULO TIPO TURISMO

En la Figura 7-18 se puede ver la secuencia de imágenes de esta prueba. Se ha seleccionado un intervalo de tiempo de 30 ms entre cada imagen con el objetivo de mostrar la secuencia real de la simulación. El orden cronológico de las ilustraciones es de izquierda a derecha y de arriba abajo.

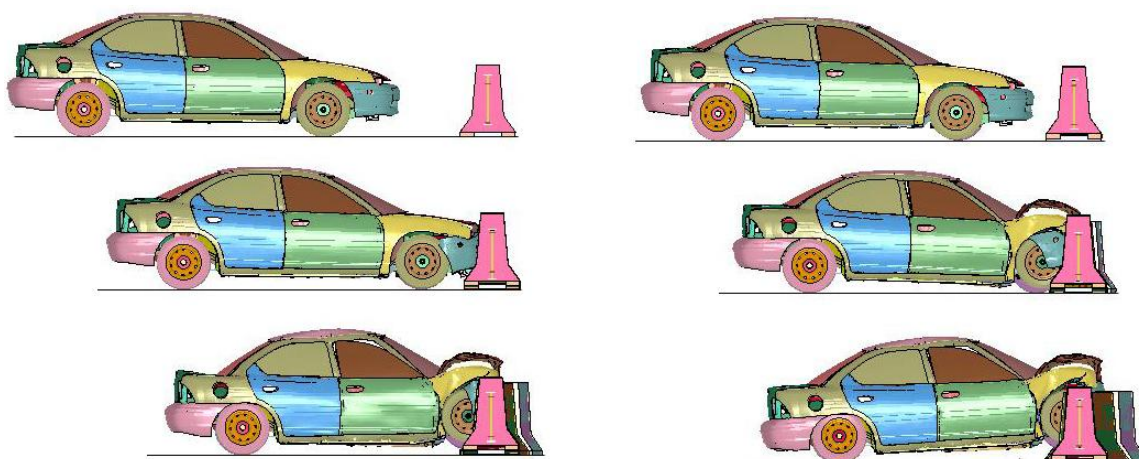


Figura 7-18 Secuencia impacto frontal Neon contra barrera de hormigón

Los datos necesarios, para el análisis de esta simulación, se han obtenido gracias a un acelerómetro situado en el centro de gravedad del vehículo. Estos datos están referenciados al sistema de coordenadas local del vehículo, dado por el propio acelerómetro, que coincide con el sistema de coordenadas global del modelo. A continuación se muestran los resultados obtenidos aplicando la norma expuesta en el capítulo 6 para el cálculo del índice ASI.

Mediante LS-PREPOST se han obtenido las gráficas de la variación de la velocidad y de la aceleración con el tiempo. En la gráfica de la velocidad, Figura 7-19, se observa como la velocidad empieza a disminuir drásticamente transcurridos 46 ms, instante en el que se produce el contacto entre el coche y la barrera de seguridad.

Para el cálculo del índice ASI se tomarán, conforme viene indicado en la normativa UNE EN 1317 [20], la velocidad del vehículo en ese instante de tiempo ($t=46$ ms) y la velocidad transcurridos 50 ms desde ese momento ($t=96$ ms) para el cálculo de la aceleración media. Este intervalo de tiempo coincide con la máxima variación de la aceleración como se puede ver en la Figura 7-20.

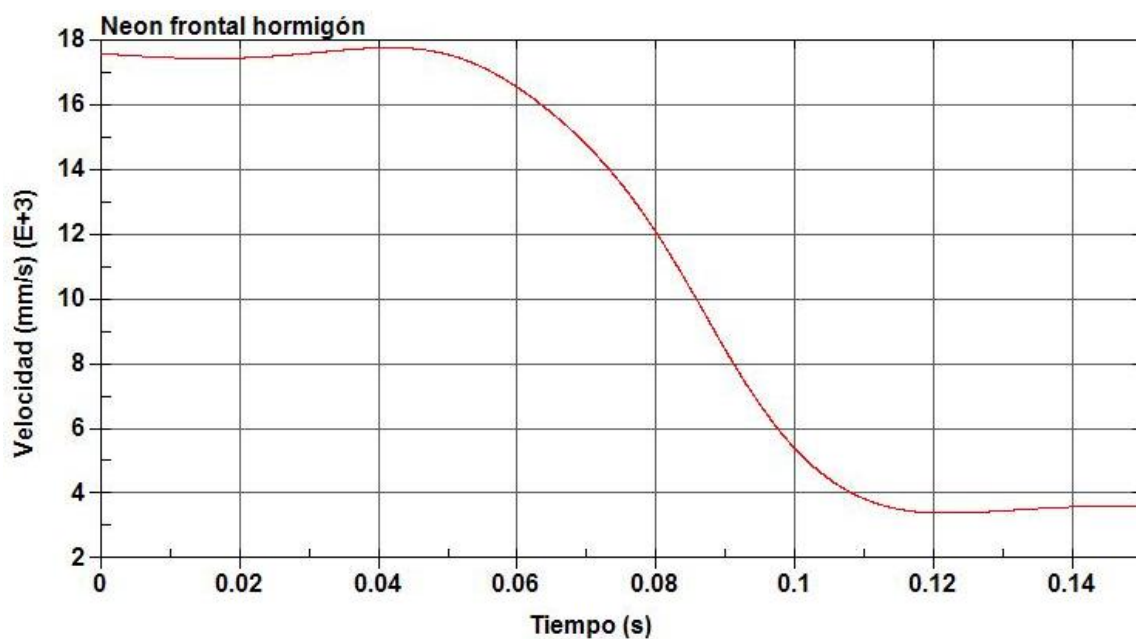


Figura 7-19 Gráfica de la velocidad en dirección X Neon

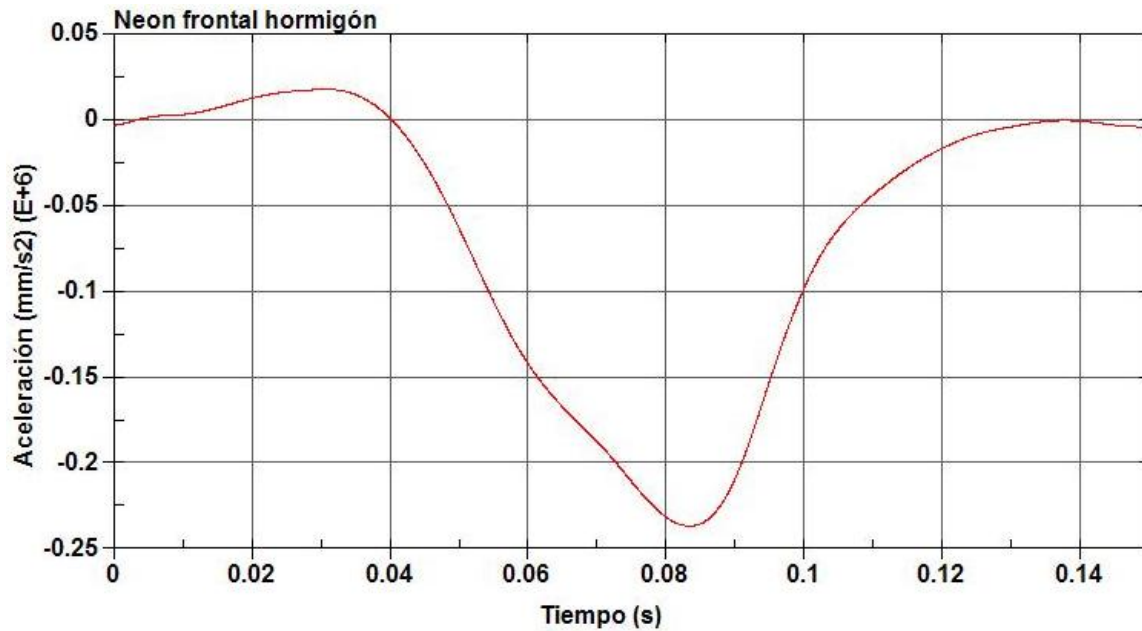


Figura 7-20 Gráfica de la aceleración en dirección X Neon

Para calcular la aceleración media en el intervalo de tiempo indicado anteriormente, se emplea la tabla de datos que proporciona LS-PREPOST a partir de la gráfica de la Figura 7-19. Empleando esos valores y la ecuación del movimiento rectilíneo uniformemente acelerado (MRUA), mostrada en la ecuación 4, se obtiene la aceleración. Sustituyendo los datos en la ecuación 4, se obtiene:

$$\bar{a}_x = \frac{17.78 - 6.4}{0.05} = 227.6 \text{ m/s}^2 = 23.2g$$

Como se indicó en apartados anteriores, al tratarse de un impacto completamente frontal, la aceleración transversal (eje Y) y la aceleración vertical (eje Z) son despreciables frente a la aceleración longitudinal (eje X).

Por último en este apartado se calcula el índice ASI con el valor obtenido de la aceleración en la dirección longitudinal X, según se indicó en el capítulo 6 empleando la ecuación 3.

$$ASI(t) = \left[\left(\frac{23.2}{12} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 1.93$$

Para este tipo de choque, con un índice $ASI=1.93$, la norma UNE EN 1317, considera que las lesiones sufridas por los ocupantes serían de tipo muy graves-mortales.

7.4. CHOQUE LATERAL CONTRA BARRERA DE HORMIGÓN

En la cuarta parte del proyecto, se simula, por separado, el impacto lateral del vehículo tipo todo-terreno y del vehículo tipo turismo contra la misma barrera empleada en el apartado 7.3. La velocidad inicial en ambos casos de impacto lateral es de 50 km/h, y los datos requeridos para el análisis se han registrado cada 5 ms. Las simulaciones se han efectuado con el código LS-DYNA versión 970. Los resultados obtenidos se muestran en los apartados 7.4.1 y 7.4.2.

7.4.1. VEHÍCULO TIPO TODO-TERRENO

En la Figura 7-21 se puede ver la secuencia de imágenes de esta prueba. Se ha seleccionado un intervalo de tiempo de 100 ms entre cada imagen con el objetivo de mostrar la secuencia real de la simulación. El orden cronológico de las ilustraciones es de izquierda a derecha y de arriba abajo.

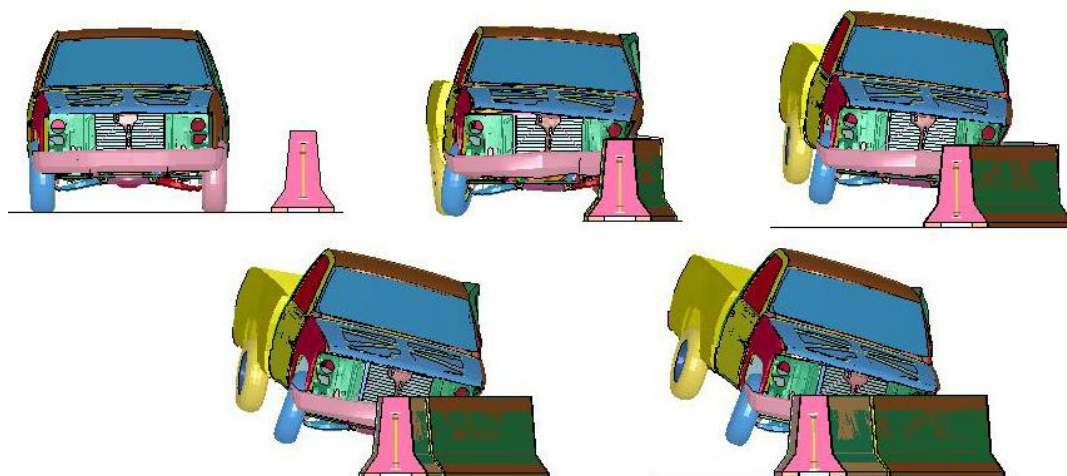


Figura 7-21 Secuencia impacto lateral Chevrolet contra barrera hormigón

Los datos necesarios, para el análisis de esta simulación, se han obtenido gracias a un acelerómetro situado en el centro de gravedad del vehículo. Estos datos están referenciados al sistema de coordenadas local del vehículo, dado por el propio acelerómetro, que coincide con el sistema de coordenadas global del modelo. A continuación se muestran los resultados obtenidos aplicando la norma expuesta en el capítulo 6 para el cálculo del índice ASI.

Mediante LS-PREPOST se han obtenido las gráficas de la variación de la velocidad y de la aceleración con el tiempo. En la gráfica de la velocidad, Figura 7-22, se observa como la velocidad empieza a disminuir drásticamente transcurridos 45 ms, instante en el que se produce el contacto entre el coche y la barrera de seguridad.

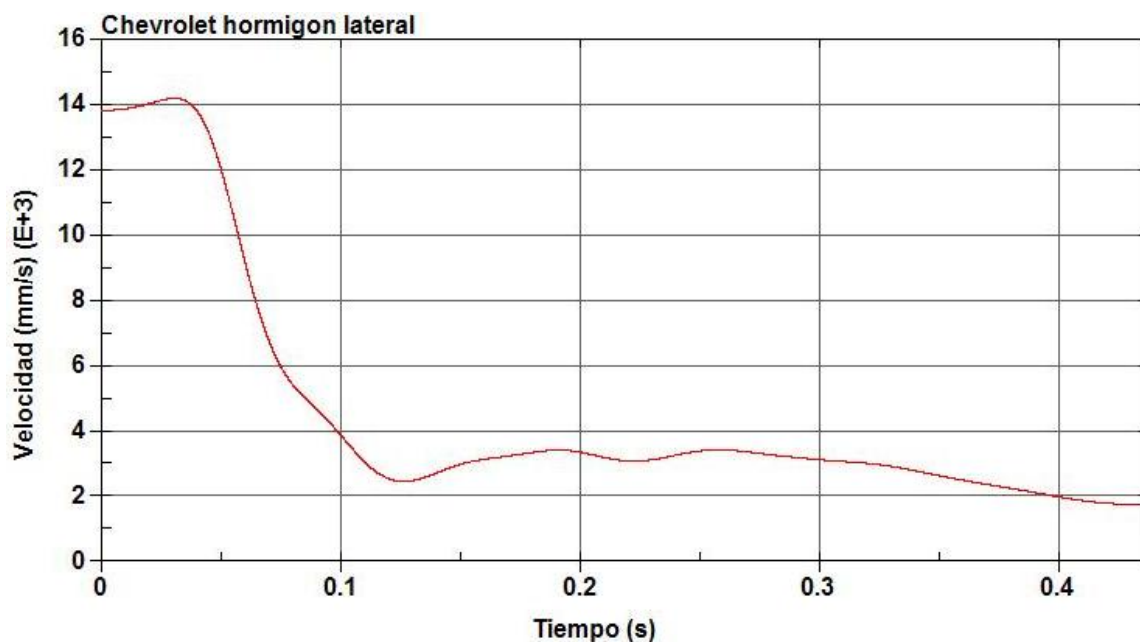


Figura 7-22 Gráfica de la velocidad en dirección Y Chevrolet

Para el cálculo del índice ASI se tomarán, conforme viene indicado en la normativa UNE EN 1317 [20], la velocidad del vehículo en ese instante de tiempo ($t=45$ ms) y la velocidad transcurridos 50 ms desde ese momento ($t=95$ ms). Este intervalo de tiempo coincide con la máxima variación de la aceleración como se puede ver en la Figura 7-23.

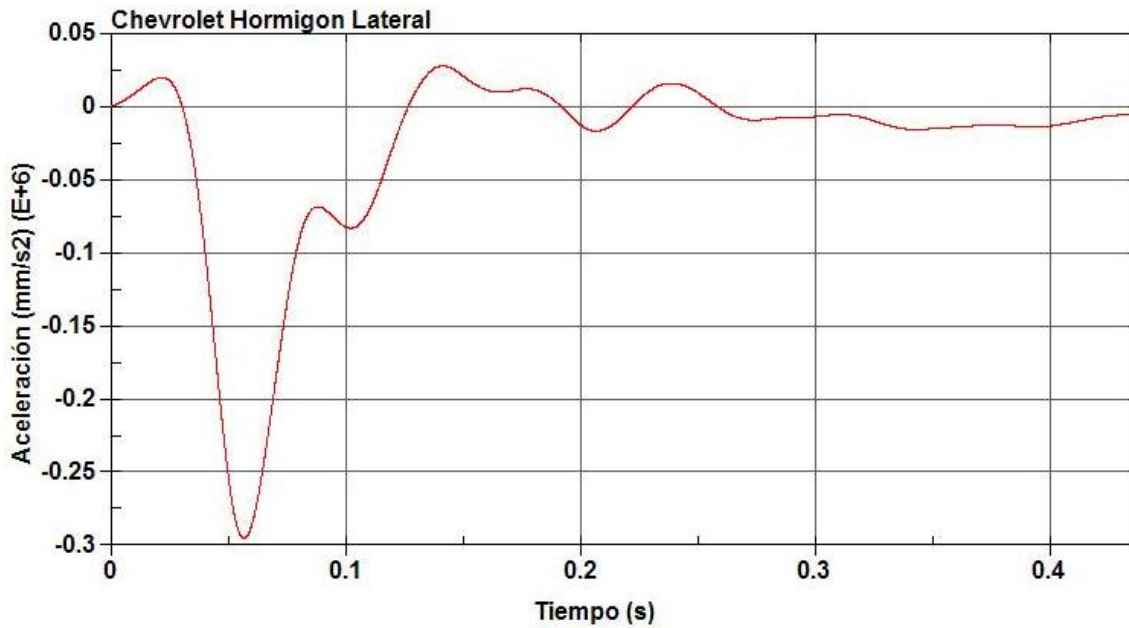


Figura 7-23 Gráfica de la aceleración en dirección Y Chevrolet

Para calcular la aceleración media en el intervalo de tiempo indicado anteriormente, se emplea la tabla de datos que proporciona LS-PREPOST a partir de la gráfica de la Figura 7-22. Empleando esos valores y la ecuación del movimiento rectilíneo uniformemente acelerado (MRUA), mostrada en la ecuación 4, se obtiene la aceleración. Sustituyendo los datos en la ecuación 4, se obtiene:

$$\bar{a}_y = \frac{13.12 - 4.31}{0.05} = 176.2 \text{ m/s}^2 = 17.96g$$

Al tratarse de un impacto completamente lateral, la aceleración longitudinal (eje X) y la aceleración vertical (eje Z) son despreciables frente a la aceleración transversal (eje Y).

Por último en este apartado se calcula el índice ASI con el valor obtenido de la aceleración en la dirección longitudinal Y, según se indicó en el capítulo 6 empleando la ecuación 3.

$$ASI(t) = \left[\left(\frac{17.96}{9} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 1.99$$

Para este tipo de choque, con un índice $ASI=1.99$, la norma UNE EN 1317, considera que las lesiones sufridas por los ocupantes serían muy graves-mortales.

7.4.2. VEHÍCULO TIPO TURISMO

En la Figura 7-24 se puede ver la secuencia de imágenes de esta prueba. Se ha seleccionado un intervalo de tiempo de 30 ms entre cada imagen con el objetivo de mostrar la secuencia real de la simulación. El orden cronológico de las ilustraciones es de izquierda a derecha y de arriba abajo.

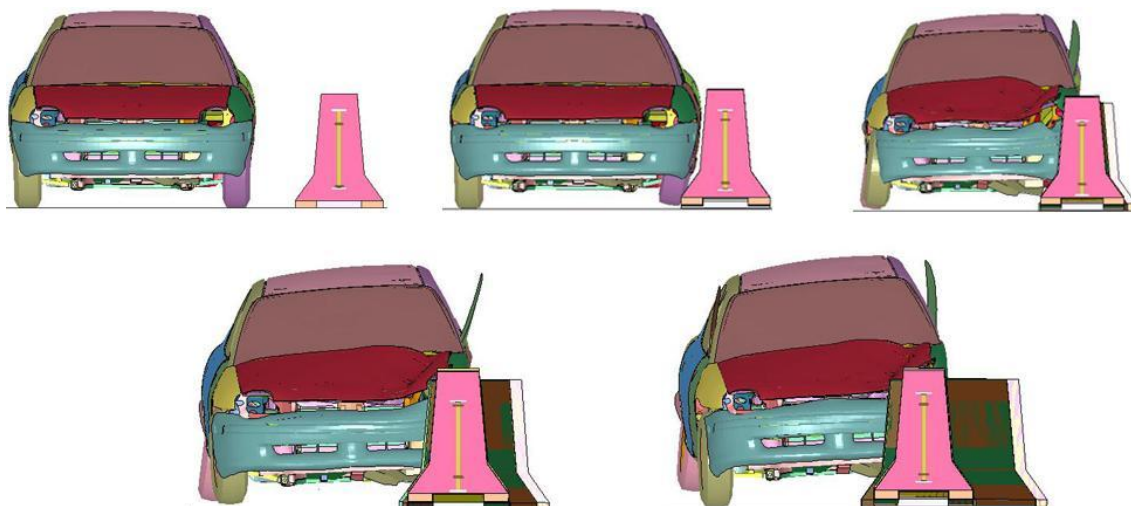


Figura 7-24 Secuencia impacto lateral Neon contra barrera hormigón

Los datos necesarios, para el análisis de esta simulación, se han obtenido gracias a un acelerómetro situado en el centro de gravedad del vehículo. Estos datos están referenciados al sistema de coordenadas local del vehículo, dado por el propio acelerómetro, que coincide con el sistema de coordenadas global del modelo. A continuación se muestran los resultados obtenidos aplicando la norma expuesta en el capítulo 6 para el cálculo del índice ASI.

Mediante LS-PREPOST se han obtenido las gráficas de la variación de la velocidad y de la aceleración con el tiempo. En la gráfica de la velocidad, Figura 7-25, se observa como la velocidad empieza a disminuir drásticamente transcurridos 22 ms, instante en el que se produce el contacto entre el coche y la barrera de seguridad.

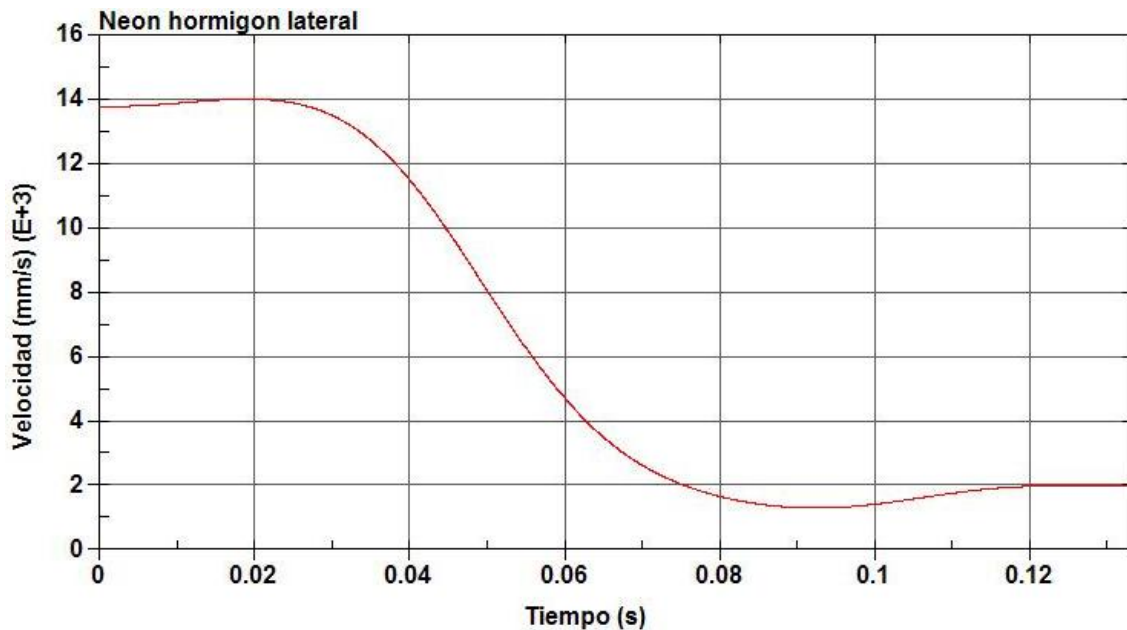


Figura 7-25 Gráfica de la velocidad en dirección Y Neon

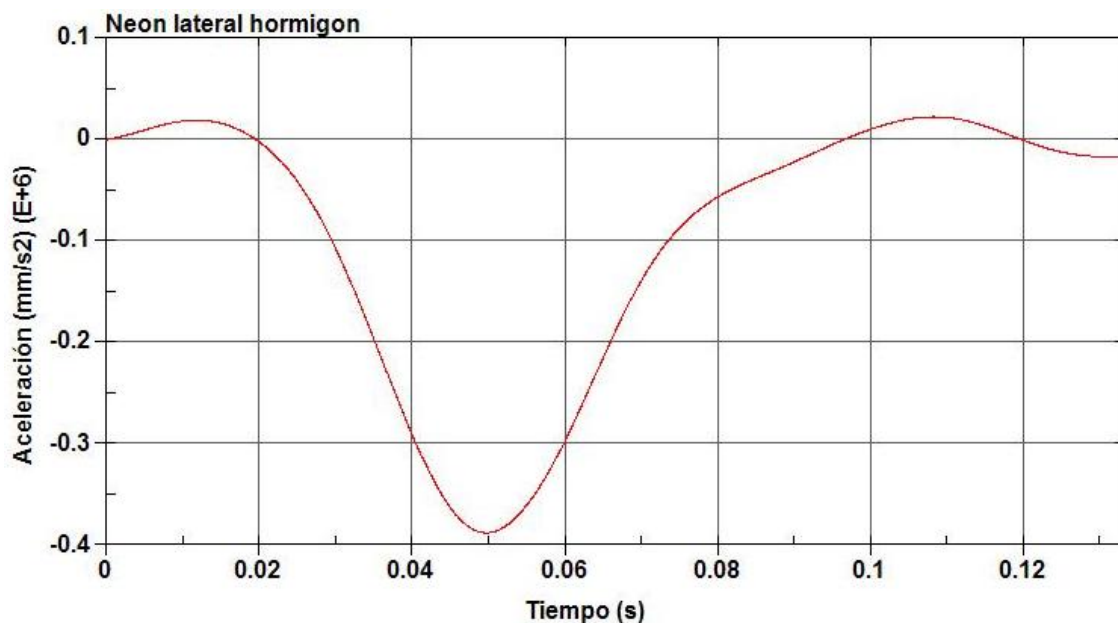


Figura 7-26 Gráfica de la aceleración en dirección Y Neon

Para el cálculo del índice ASI se tomarán, conforme viene indicado en la normativa UNE EN 1317 [20], la velocidad del vehículo en ese instante de tiempo ($t=22$ ms) y la velocidad transcurridos 50 ms desde ese momento ($t=72$ ms). Este intervalo de tiempo coincide con la máxima variación de la aceleración como se puede ver en la Figura 7-26.

Para calcular la aceleración media en el intervalo de tiempo indicado anteriormente, se emplea la tabla de datos que proporciona LS-PREPOST a partir de la gráfica de la Figura 7-25. Empleando esos valores y la ecuación del movimiento rectilíneo uniformemente acelerado (MRUA), mostrada en la ecuación 4, se obtiene la aceleración. Sustituyendo los datos en la ecuación 4, se obtiene:

$$\bar{a}_y = \frac{14 - 2.39}{0.05} = 232.2 \text{ m/s}^2 = 23.67g$$

Al tratarse de un impacto completamente lateral, la aceleración longitudinal (eje X) y la aceleración vertical (eje Z) son despreciables frente a la aceleración transversal (eje Y).

Por último en este apartado se calcula el índice ASI con el valor obtenido de la aceleración en la dirección longitudinal Y, según se indicó en el capítulo 6 empleando la ecuación 3.

$$ASI(t) = \left[\left(\frac{23.67}{9} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 2.63$$

Para este tipo de choque, con un índice $ASI=2.63$, la norma UNE EN 1317, considera que las lesiones sufridas por los ocupantes serían letales.

7.5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Una vez obtenidos todos los resultados, se procede a compararlos y analizarlos para obtener las conclusiones del estudio realizado.

Como se ha podido observar en los apartados anteriores, el índice ASI varía considerablemente en función del tipo de barrera y del tipo de vehículo empleado. Los resultados de estas simulaciones se han resumido en la Tabla 7-1 para los impactos frontales, y en la Tabla 7-2 para los impactos laterales.

| ASI FRONTAL | Chevrolet C 1500 | Dodge Neon |
|--------------------|------------------|------------|
| Barrera Metálica | 0,76 | 0,73 |
| Barrera Hormigón | 1,25 | 1,93 |

Tabla 7-1 Resultados ASI Impactos Frontales

| ASI LATERAL | Chevrolet C 1500 | Dodge Neon |
|--------------------|------------------|------------|
| Barrera Metálica | 1,11 | 1,37 |
| Barrera Hormigón | 1,99 | 2,63 |

Tabla 7-2 Resultados ASI Impactos Laterales

A partir de los resultados obtenidos se puede concluir que, en los dos casos de impacto frontal contra barrera metálica, el índice de severidad de aceleración es prácticamente similar en ambos vehículos. Por tanto según viene indicado en la norma UNE EN 1317, los daños que sufrirían los ocupantes en cualquiera de estas dos situaciones serían de tipo leve. Por otro lado, en los dos casos de impacto lateral contra barrera metálica, el ASI es muy similar para los dos vehículos, siendo algo superior en el Dodge Neon (vehículo tipo turismo). Aunque esta diferencia no afecta a la clasificación de daños que sufrirían los ocupantes, ya que en ambos casos sufrirían lesiones de tipo medio-graves, siendo algo más severas en el caso del turismo.



En los cuatro casos de impactos contra la barrera de hormigón, tanto frontales como laterales, el vehículo tipo todo-terreno obtiene mejores resultados de índice ASI que el vehículo tipo turismo. En todas las situaciones, los ocupantes sufrirían lesiones muy graves-letales, excepto en el impacto frontal del vehículo todo-terreno, en el que las lesiones serían de tipo medio.

Como se ha podido observar, en las simulaciones de choque contra barrera de hormigón, se obtienen los resultados más desfavorables, tanto en el impacto frontal como lateral, comparados con la barrera metálica. Esto se debe a que la barrera metálica está constituida en su mayor parte por acero, este material tiene gran capacidad de absorción de energía a través de su deformación.



8. CONCLUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS

El punto de partida de este proyecto ha sido el proyecto titulado *Choque frontal contra distintos tipos de barrera* de David Illescas Pérez [1], a partir del cual se han desarrollado distintos modelos de simulación para alcanzar el objetivo planteado inicialmente: establecer la comparativa del índice ASI entre dos tipos diferentes de vehículos ante distintos casos de impacto.

Es importante indicar que la dificultad de este proyecto ha sido definir las condiciones de contorno (velocidades y contactos entre superficies), ya que los modelos empleados, tanto las barreras como los vehículos, han sido obtenidos por NCAC. Dada la complejidad e importancia de las condiciones de contorno que rodean a este tipo de problemas su definición en LS-PREPOST no ha sido sencilla.

Después de la realización de este proyecto se extraen dos conclusiones, por un lado el gran potencial del método de elementos finitos, particularizado en los programas LS-DYNA y LS-PREPOST, que permiten simular impactos,



como en los casos estudiados en este proyecto, aproximándose bastante a la realidad, y por otro lado, la gran importancia que tiene el diseño y la elección de los materiales que forman parte de la estructura tanto del vehículo como de la barrera de seguridad. De estos dos aspectos (materiales y diseño) dependerá en gran medida la seguridad de los ocupantes del vehículo ante un posible accidente.

A partir de este proyecto, es posible realizar diferentes trabajos futuros. Una variante de este proyecto, podría ser la simulación del atropello de un dummy con diferentes tipos de vehículos (turismo, todo-terreno, etc.), con el fin de evaluar las lesiones que sufriría el dummy en función de la geometría de los distintos vehículos empleados.

Otra posibilidad, sería variar las condiciones de contorno que se han impuesto en este proyecto. Se podría cambiar el coeficiente de rozamiento, ángulo de impacto, velocidad, etc. También se podrían estudiar impactos similares a los de este proyecto, pero empleando vehículos industriales (camiones) o vehículos destinados al transporte de personas (mini-buses, autobuses, autobuses de dos pisos y autobuses articulados). Posteriormente se evaluarían los daños sufridos por los ocupantes de los diferentes tipos de vehículos.

Además, en el caso de la simulación de los vehículos destinados al transporte de personas, se podría establecer una comparativa de los daños sufridos por los ocupantes en función de su situación en el interior del autobús.

Para finalizar, otro estudio interesante sería simular el impacto entre dos vehículos distintos en diferentes situaciones: impacto frontal, lateral, oblicuo, trasero; para evaluar los daños que sufren los ocupantes.



9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Choque contra distintos tipos de barrera. David Illescas Pérez – Proyecto fin de carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Octubre 2009.
- [2] Web LS-DYNA www.ls-dyna.com (mayo, 2010).
- [3] Investigación de accidentes de tráfico. Estudio del automóvil. Pablo Luque Rodríguez y Daniel Álvarez Mántaras. Universidad de Oviedo.
- [4] Revista digital km77 – Área técnica. www.km77.com (mayo, 2010).
- [5] Volvo – City-safety. www.volvocars.com (mayo, 2010).
- [6] Manual de automóviles. Arias-Paz. 56ª Edición, 2008.
- [7] Volkswagen – Técnica. www.volkswagen.es (mayo, 2010).
- [8] Apuntes asignatura Teoría de Vehículos – Universidad Carlos III de Madrid. Octubre 2009.
-



- [9] Tratado sobre automóviles. Tecnología del automóvil. José Font Mezquita, Juan F. Dols Ruiz y Juan F Dols Ruiz. Universidad Politécnica de Valencia.
- [10] Honda – Tecnología-Seguridad. www.honda.es (mayo, 2010).
- [11] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial INTA. www.inta.es (mayo, 2010).
- [12] Estudio sobre el uso del reposacabezas. Fundación Mapfre y Cesvimap.
- [13] EuroNCAP - www.euroncap.com (mayo, 2010).
- [14] El método de los elementos finitos: Las bases. O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor. Editorial CIMNE, 5ª Edición. 2004.
- [15] LS-DYNA Theoretical Manual. Recopilado por John O. Hallquist – Editado por Livermore Software Technology Corporation. Mayo 1998.
- [16] LS-DYNA Keyword User`s Manual, version 970. Livermore Software Technology Corporation. Abril 2003.
- [17] LS-DYNA Support. www.dynasupport.com (mayo 2010).
- [18] National Crash Analysis Center. www.ncac.gwu.edu (mayo, 2010).
- [19] Copremesal. Protección y Seguridad vial. www.copremesal.com (mayo, 2010).
- [20] Computational and experimental crash analysis of the road safety barrier
Z. Ren, M. Vesenjok. Abril 2005.